

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI  
PROGETTI PALERMO

SOGGETTO TECNICO:



DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO  
S.O. INGEGNERIA

PROGETTAZIONE:

SINTAGMA S.r.l. - ITALIANA SISTEMI S.r.l.

TIMBRO E FIRMA DEL PROGETTISTA



### PROGETTO DEFINITIVO

**ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO - TRAPANI (Via Milo)  
TRATTA: CINISI (i) - ALCAMO DIRAMAZIONE (i)**

### OOCC-RIQUALIFICAZIONE GALLERIA SPADAFORA

Galleria Spadafora - Relazione di calcolo Rivestimento

SCALA

Foglio      di

PROGETTO/ANNO	SOTTOPR.	LIVELLO	NOME DOC.	PROGR.OP.	FASE FUNZ.	NUMERAZ.
304817	S01	PD	TSGL	48	001	E015A

Revis.	Descrizione	Progettista	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione	Ing. A. La Tessa	06.2019						

LINEA	SEDE TECN.	NOME DOC.	NUMERAZ.
Verificato e trasmesso	Data	Convalidato	Data

## SOMMARIO

1.-. PREMESSA .....	2
2.-. NOTE GENERALI SULL'OPERA .....	3
2.1.-. INFORMAZIONI GENERALI .....	3
2.2.-. CRITICITÀ .....	6
2.3.-. INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE PREVISTI.....	6
3.-. NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA .....	9
4.-. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO - INDAGINI SU TERRENI E STRUTTURE.....	10
4.1.-. GENERALITÀ.....	10
4.2.-. CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 1993 .....	10
4.3.-. CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 2020 - TERRENI.....	13
4.4.-. CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 2020 - STRUTTURE .....	13
5.-. FASE CONOSCITIVA .....	15
5.1.-. INQUADRAMENTO LITOLOGICO E STRATIGRAFICO.....	15
5.2.-. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO .....	17
5.3.-. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI .....	20
5.4.-. MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO .....	22
5.5.-. STRUTTURE - LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA.....	24
5.6.-. GEOMETRIA E PROPRIETÀ DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO .....	25
6.-. DIMENSIONAMENTO DEGLI INTERVENTI.....	28
6.1.-. CRITERI DI PROGETTO .....	28
6.2.-. ANALISI DEI CARICHI .....	29
6.3.-. COEFFICIENTI DI SOTTOFONDO PER L'ANALISI TERRENO-STRUTTURA .....	31
6.4.-. RESISTENZE DI PROGETTO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI.....	32
6.5.-. ANALISI DELLO STATO DI FATTO.....	34
6.5.1.-. Modelli e metodi di analisi .....	34
6.5.2.-. Risultati delle analisi e Verifiche di sicurezza .....	36
6.5.3.-. Confronto sollecitazioni di progetto con le misure di stato tensionale in sito (martinetti piatti singoli).....	38
6.6.-. ANALISI DI PROGETTO .....	38
6.6.1.-. Modelli metodi di analisi .....	38
6.6.2.-. Verifica del rivestimento definitivo esistente in calcarenite .....	40
6.6.3.-. Dimensionamento blindaggio interno.....	41
6.6.4.-. Verifica della trave di collegamento dei micropali .....	43
6.6.5.-. Dimensionamento dei micropali.....	46
7.-. ALLEGATI.....	52
7.1.-. ANALISI DELLO STATO DI FATTO – RISULTATI.....	52
7.2.-. ANALISI DI PROGETTO – RISULTATI.....	59
7.3.-. RILIEVO GEOMETRICO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO – ELABORAZIONE DEI RISULTATI .	65

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)	
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI    PAGINA <b>2 / 66</b>

## 1.-.PREMESSA

La presente **RELAZIONE DI CALCOLO** riporta i risultati delle analisi e delle verifiche statiche, di tipo strutturale e geotecnico, necessarie per il dimensionamento degli interventi proposti per la riqualificazione della **Galleria n°2 - Spadafora** ubicata tra la Progr. km 51+776 e la Progr.km 52+162,45 della Linea:

**PALERMO – TRAPANI (VIA MILO):                      TRATTA: CINISI – ALCAMO**

Per la galleria in questione sono previsti i seguenti interventi prioritari di riqualificazione funzionale (interventi finalizzati alla eliminazione di infiltrazioni di acque meteoriche) e statica, necessari per garantire la sicurezza dell'Esercizio Ferroviario:

- ***stabilizzazione della sezione completa del cavo, nei tratti necessari;***
- ***eliminazione di infiltrazioni di acqua in corrispondenza della volta e dei piedritti;***

I suddetti interventi rientrano nell'ambito degli interventi di adeguamento e riqualificazione, al di là di quanto previsto per le opere di Armamento (abbassamento del piano ferro) da porre in essere nelle Gallerie, ubicate nel Lotto [ 1 ] – tratta Cinisi Alcamo - della Linea Palermo Trapani Via Milo in relazione alla realizzazione degli impianti di Trazione Elettrica di Linea previsti dal Contratto Applicativo n.22/2018, nell'ambito dell'Accordo Quadro n. 341/2016, affidato da RFI al raggruppamento SINTAGMA – ITALIANA SISTEMI, per realizzare la **“Progettazione Definitiva dei lavori relativi alla realizzazione degli impianti di Trazione Elettrica ferroviaria, Sottostazioni Elettriche, Luce e Forza Motrice in galleria delle tratte e stazioni comprese tra la Stazioni di Cinisi e la Stazione di Trapani compresa la Cabina TE di Piraineto”**.

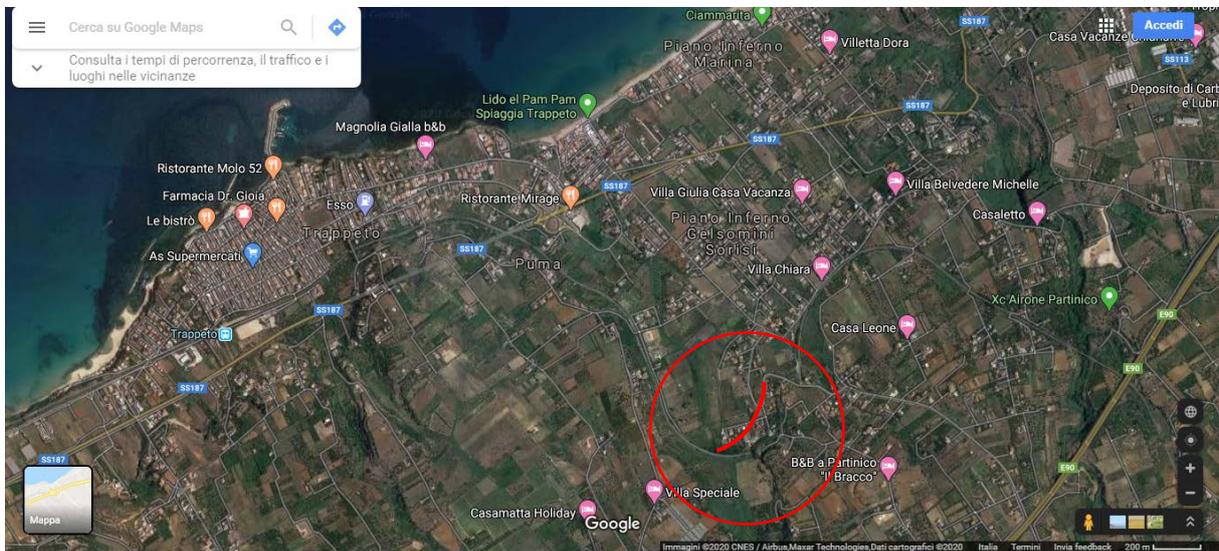
## 2.-.NOTE GENERALI SULL'OPERA

### 2.1.-.INFORMAZIONI GENERALI

La Galleria Spadafora è situata su una tratta della lunghezza di circa 386,45 m, con imbocco al km 51+776 e sbocco al km 52+162,45, della linea Palermo – Trapani via Milo - Tratta Cinisi – Alcamo, in prossimità, lato Trapani, della Stazione di Trappeto (km 99+809).

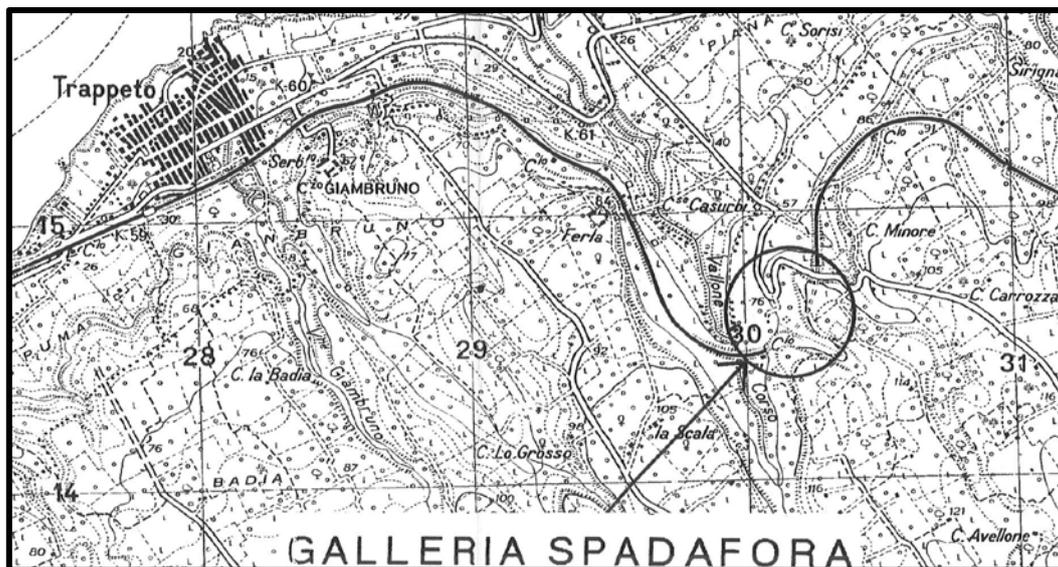
La linea è ivi a semplice binario ed è elettrificata; il tracciato corre con andamento planimetrico curvilineo ( $R_{\min} = 262$  m ed  $R_{\max} = 350$  m) con livelletta caratterizzata da una pendenza  $i=0,0015$ .

Di seguito si riporta una vista satellitare del sito con indicazione del tracciato della galleria.



**Figura 1 – Vista satellitare con tracciato galleria**

Di seguito si riporta inoltre una corografia con indicazione del tracciato della galleria.



**Figura 2 - Corografia con tracciato galleria**

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	 <p><b>ITALIANA SISTEMI</b> s.r.l.</p>
<p>CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSGGL48001E015A</b></p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p><b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI PAGINA <b>4 / 66</b></p>
<p>La galleria Spadafora è stata oggetto di ripetuti sopralluoghi qualitativi e quantitativi, conoscitivi e misurazioni, effettuate in varie date del 2018, 2019 e 2020, nel corso dei quali sono state effettuate le seguenti indagini:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• analisi puntuale sulle condizioni generali e statiche del rivestimento;</li> <li>• documentazione fotografica;</li> <li>• indagine sullo spessore di pietrisco sotto traversa per verificare la quota del piano di regolamento e la presenza di canaletta e di arco rovescio;</li> <li>• indagine qualitativa sul sottofondo mediante carotaggi per verificare tipologia e consistenza;</li> <li>• indagine all'attacco piedritti/arco rovescio per verificare tipologia e profondità del piano di posa dei piedritti.</li> </ul> <p>Inoltre sono stati forniti da RFI - DTP di Palermo, i seguenti ulteriori dati e documenti:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ rilievo di dettaglio delle sezioni di galleria (armamento incluso) per una verifica dei franchi.</li> <li>✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 1993: sui terreni e sulle strutture, commissionata da Ferrovie dello Stato S.p.A. a <i>“Società Italiana di Geofisica S.r.l. ” nell'ambito dei “Lavori di consolidamento e adeguamento a sagoma, di tratti del rivestimento murario della Galleria Spadafora – Linea PA-TP”;</i></li> <li>✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 2020: sui terreni, commissionata dalla ATI VI.DR srl/Eurofer Costruzioni srl al Geol.Dott.G.Marino;</li> <li>✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 2020: sulle strutture, commissionata dall'Impresa Lotto 1 Palermo Società Consortile a.r.l. alla rete inter-laboratorio Geolab s.r.l. nell'ambito del <i>“Contratto applicativo n.9/2017 – A.Q.N.341/2016 del 29/11/2016 Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della Linea Palermo – Trapani Via Milo</i></li> </ul> <p>In relazione ai dati riscontrati dalle indagini e rilievi di cui sopra, si è reso evidente che:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• il complesso binario/traverse, nei punti di indagine, ha evidenziato uno spessore di pietrisco sottotraversa di circa 15 cm;</li> <li>• la galleria è dotata di arco rovescio realizzato con conci di calcarenite sigillati con malte idrauliche;</li> <li>• al centro dell'arco rovescio è realizzata una canaletta acque di dimensioni BxH = 40x25 cm, coperta da una coppella in materiale calcarenitico compatto di spessore s = 8 cm circa;</li> <li>• l'arco rovescio si innesta correttamente sui piedritti ed è ad essi connesso;</li> <li>• superato lo spessore dell'arco rovescio (s = 45 cm circa) si ritrova uno strato di calcarenite di notevole potenza.</li> </ul> <p>Tutto quanto sopra premesso, appare che la Galleria N° [ 2 ] – Spadafora, a causa delle sue ridotte condizioni di franco pf/volto, ridotto spessore della massicciata, nonché per le caratteristiche</p>		

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	
<p>CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b></p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA –RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p><b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI PAGINA <b>5 / 66</b></p>

costruttive (presenza arco rovescio), richieda interventi impattanti, sia dal punto di vista tecnico che economico, che temporale.

Inoltre, **ma anzi, principalmente**, date le copiose infiltrazioni di acqua presenti nel tratto terminale (circa 150 m), lato Trapani, risulta necessario un importante intervento di “sigillatura ed impermeabilizzazione” del paramento, oltre che di riqualificazione del sistema di drenaggio.

In dettaglio, dopo approfondite considerazioni, in relazione alla realizzazione della Linea di Contatto che, in fase finale dovrà presentare **un franco minimo pf/LdC h = 4,65 m**, risulta necessario prevedere un intervento di abbassamento del p.f. al massimo pari ad h = 30 cm, agendo, come esposto nella Relazione Generale Illustrativa, sulla quota del binario.

In relazione a tale determinazione gli interventi da eseguire saranno i seguenti:

#### **OPERE DI ARMAMENTO**

Abbassamento dell'intero p.f. dell'armamento di h = 30 cm che richiederà, data la presenza nella galleria dell'arco rovescio e della relativa canaletta centrale di raccolta acque, i seguenti accorgimenti:

- ✓ ***risagomatura e modesto ribassamento, mediante fresatura controllata, dell'arco rovescio in corrispondenza della connessione con i piedritti;***
- ✓ ***riqualificazione della canaletta di drenaggio esistente, con utilizzo di una fodera in vetroresina opportunamente ad essa connessa;***
- ✓ ***utilizzo di traverse ribassate per galleria L = 230 cm con piastra di elastomero sottotraversa per ridurre le sollecitazioni indotte sull'arco rovescio;***

#### **OPERE CIVILI**

Interventi di riqualificazione del paramento con sigillatura e consolidamento strutturali del cavo mediante:

- ✓ ***Risanamento strutturale ed impermeabilizzazione della calotta e piedritti;***
- ✓ ***impermeabilizzazione nicchie;***
- ✓ ***realizzazione di dreni per la captazione delle acque di percolamento;***
- ✓ ***realizzazione di collegamenti tra le canalette laterali e la canaletta centrale;***

Gli interventi sono riportati negli Elaborati di seguito definiti:

**304817 S01 PD TTLC 48 001 E0C03A: INTERVENTO 1 – RISANAMENTO MURATURA**

**304817 S01 PD TTLC 48 001 E0C04A: INTERVENTO 2 – DRENAGGI GALLERIA**

**304817 S01 PD TTLC 48 001 E0C05A: INTERVENTO 3 – RISANAMENTO NICCHIE**

**La presente RELAZIONE DI CALCOLO si occupa esclusivamente degli interventi strutturali.**

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)	 <b>ITALIANA SISTEMI</b> S.r.l.		
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>PAGINA</td> <td>6 / 66</td> </tr> </table>	PAGINA	6 / 66
PAGINA	6 / 66			

## 2.2.-..CRITICITÀ

Gli aspetti più critici, che interessano la Galleria Spadafora di lunghezza totale  $L = 386$  m circa, sono:

- Partendo dall'imbocco, lato Palermo (km 51+776), essa si sviluppa per circa 175 m, fino al km 51+950 circa, all'interno di una facies litoide più profonda data da prevalente argilla limosa includente, a tratti, dei livelletti od orizzonti di sabbia fine. **Questa facies è contraddistinta da buone proprietà meccaniche e ridotta permeabilità.**
- Dal km 51+950 al km 52+162,45 (sbocco lato Trapani), quindi per circa 211 m, la galleria si sviluppa, sempre all'interno delle facies argillose limose più profonde, per quanto riguarda l'arco rovescio e i piedritti. Tuttavia, nella zona di calotta, essa intercetta dei litotipi sabbiosi limosi ghiaiosi appartenenti ad una facies, più superficiale, dei sedimenti marini a granulometria sabbiosa ghiaiosa limosa ed alla facies detritico/colluviale, permeate dalla falda. Ciò comporta che, nella tratta terminale della galleria in prossimità, dello sbocco lato Trapani si manifestino copiose venute d'acqua.

Premesso quanto sopra, si ricorda che la presente Relazione di Calcolo si riferisce, esclusivamente, alla tratta compresa tra la pk 51+950 e la pk 52+162,45 (sbocco lato Trapani) e evidenzia gli interventi previsti negli ultimi 200 m – lato Trapani – dove, l'infiltrazioni di acque di falda, meteoriche, stanno determinando "guasti" impositivi, sia sulle opere murarie che sugli impianti.

Nel merito, Il profilo geolitologico posto alla base della presente progettazione (che sarà meglio illustrato nel seguito) e restituito dai Dati di Base delle indagini rese disponibili, evidenzia che, in questa tratta, sono presenti delle coperture modeste che vanno da un massimo di 14,00 m ad un minimo di 2,20 m. In particolare, la copertura minima è stata riscontrata in prossimità del km 52+053. Qui la copertura è risultata di appena 2,20 m e costituita essenzialmente da materiale estremamente scadente per caratteristiche fisico meccaniche e di addensamento. Si tratta, infatti, di terreno vegetale e materiale di riporto, posti a colmamento di una depressione artificiale (riscontrabile anche dall'esterno). In corrispondenza di questa sezione si registrano le infiltrazioni d'acqua più copiose. Coperture più significative si riscontrano tra la progr. 51+976 e la progr. 51+996, dove si va da un massimo di circa 14,00 m ad un minimo di circa 9,00 m.

## 2.3.-..INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE PREVISTI

Tutto quanto premesso, si descrivono, di seguito, sinteticamente gli interventi di riqualificazione previsti per la Galleria in questione.

INTERVENTO TIPO [ 1 ]: IMPERMEABILIZZAZIONE DI VOLTA E CAPTAZIONE ACQUE DI INFILTRAZIONE

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''	 <b>ITALIANA SISTEMI</b> S.r.l.
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> <b>SINTAGMA ITALIANA SISTEMI</b> PAGINA <b>7 / 66</b>
<p>L'intervento è finalizzato alla captazione delle acque di falda che interessano i terreni sovrastanti la volta della galleria nel tratto terminale, di circa 150 m, lato Trapani.</p> <p>Le caratteristiche di permeabilità dei suddetti terreni, come si dirà meglio nel seguito, sono tali che la falda è repentinamente influenzata dalle precipitazioni meteoriche. Non si determina, quindi, un battente idraulico sulla volta della galleria in quanto quest'ultima funge essa stessa da dreno.</p> <p>Il problema non è quindi di tipo statico, in quanto sulla volta della galleria non agisce un carico idraulico aggiuntivo alla spinta del terreno, bensì squisitamente idraulico, legato alla presenza di eccessive venute d'acqua incompatibili con la sicurezza dell'esercizio ferroviario.</p> <p>Inoltre, nel lungo termine, le acque di percolazione comportano il degrado delle proprietà meccaniche delle malte e, di conseguenza, il degrado delle proprietà meccaniche della muratura del rivestimento definitivo esistente.</p> <p><b>Per tali motivi si prevede, necessariamente, in primo luogo, l'intervento di impermeabilizzazione della volta della galleria in assenza del quale le acque di pioggia continuerebbero ad essere drenate dal cavo della galleria anche in presenza di eventuali ulteriori sistemi drenanti aggiuntivi di nuova realizzazione.</b></p> <p>In aggiunta agli interventi di impermeabilizzazione suddetti, al fine di evitare la formazione di un battente idrico sulla galleria, con aggravio delle condizioni statiche della volta, è necessario captare le acque di falda, che per quanto detto, sono di tipo temporaneo, legate agli afflussi meteorici, mediante un sistema di dreni suborizzontali realizzati a partire dalla pk 52+056 in cui le coperture sono pari a circa 2-3 m fino alla pk 51+950 (limite dell'intervento), proteggendo, di fatto, l'esterno del cavo medesimo.</p> <p>INTERVENTO TIPO [ 2 ]:    RISANAMENTO MURATURA</p> <p>Al fine di conseguire un incremento delle proprietà meccaniche della muratura esistente, ed inoltre nelle zone della superficie muraria che presentano ammaloramenti, si prevede il consolidamento con sigillatura dei giunti e successive iniezioni di resine espandenti.</p> <p>INTERVENTO TIPO [ 3 ]:    BLINDAGGIO DELLA GALLERIA</p> <p>Nelle tratte di galleria in cui l'intervento di Tipo [2] risulta non sufficiente a garantire il soddisfacimento delle verifiche di sicurezza previste dalla Normativa di Riferimento si prevede di realizzare un "blindaggio interno" della galleria mediante la realizzazione di una controfodera in conglomerato cementizio armato dello spessore di 20 cm. Essa troverà contrasto su di una muretta di fondazione in c.a. con sezione B x H = 45 x 50 cm insistete su micropali D = 200 mm e lunghezza L = 10 m e con un interasse pari a 60 cm, cui è altresì demandata la funzione di stabilizzazione dell'arco rovescio.</p> <p>INTERVENTO TIPO [ 4 ]:    IMPERMEABILIZZAZIONE NICCHIE</p>		



 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	 <p><b>ITALIANA SISTEMI</b> s.r.l.</p>
<p>CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSGL48001E015A</b></p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA –RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p><b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI <b>PAGINA</b> <b>9 / 66</b></p>

### 3.-.NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA

- **D.M 17/01/2018 (NTC18):** *“Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”*
- **Circ. C.S.LL.PP n°7 - 21/02/19:**(nel seguito *“Circolare”*);
- **RFI DTC-SI-GA-MA-IFS-001-C:** Manuale progettazione Opere Civili – Parte II – Sez. 4 Gallerie (nel seguito *“Manuale di progettazione”*);

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	
<p>CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b></p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA –RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p><b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI</p> <p>PAGINA <b>10 / 66</b></p>

## 4.-..DOCUMENTI DI RIFERIMENTO - INDAGINI SU TERRENI E STRUTTURE

### 4.1.-..GENERALITÀ

La presente progettazione è basata sui risultati delle seguenti campagne di indagini geognostiche e diagnostiche, condotte sui terreni attraversati dalla Galleria Spadafora e sulle strutture della galleria stessa, che, come precedentemente detto risultano:

- ✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 1993: sui terreni e sulle strutture, commissionata da Ferrovie dello Stato S.p.A. a *“Società Italiana di Geofisica S.r.l.”* nell’ambito dei *“Lavori di consolidamento e adeguamento a sagoma, di tratti del rivestimento murario della Galleria Spadafora – Linea PA-TP”*, Accompagnata alla seguente documentazione:
  - Relazione Geologico-Tecnica (data Ottobre/93);
  - Grafici prove geotecniche di laboratorio (data Ottobre/93);
  - Sezione geolitologica generale della Galleria;
  - Sezione geolitologica della zona di intervento;
- ✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 2020: sui terreni, commissionata dalla ATI VI.DR srl/Eurofer Costruzioni srl al Geol.Dott.G.Marino. Relativamente a questa campagna di indagini è stata fornita la seguente documentazione:
  - Planimetria con indicazione dell’ubicazione del sondaggio S1Dh;
  - Colonna stratigrafica ricostruita nel corso del sondaggio S1Dh.
- ✓ CAMPAGNA INDAGINI - ANNO 2020: sulle strutture, commissionata dall’Impresa Lotto 1 Palermo Società Consortile a.r.l. alla rete inter-laboratorio Geolab s.r.l. nell’ambito del *“Contratto applicativo n.9/2017 – A.Q.N.341/2016 del 29/11/2016 Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della Linea Palermo – Trapani Via Milo”*. Relativamente a questa campagna di indagine è stata fornita la seguente documentazione:
  - Rapporto di prova n°66811 del 18/03/2020 – N°protocollo SPR 13178 del 13/03/2020

### 4.2.-..CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 1993

La campagna di indagini del 1993 ha compreso:

- ✓ Rilievo topografico del profilo di intradosso delle sezioni di galleria;
- ✓ Carotaggi eseguiti dall’interno della galleria, in sezioni predeterminate, finalizzati al rilievo della natura e dello spessore del rivestimento definitivo e del terreno a tergo dello stesso;
- ✓ Indagini endoscopiche associate ai carotaggi di cui al punto precedente;
- ✓ Esecuzione di sondaggi geognostici condotti esternamente alla galleria con esecuzione di prove penetrometriche dinamiche di tipo Standard Penetration Test (SPT) nei terreni a grana grossa e prelievo di campioni indisturbati nei terreni a grana fine;

- ✓ Installazione di piezometri del tipo Casagrande e del tipo a Corda Vibrante;
- ✓ Prove di permeabilità tipo Lefranc per valutare il grado di permeabilità dei litotipi attraversati dalla galleria;
- ✓ Prove Penetrometriche Statiche di tipo SCPT (Standard Cone Penetration Test).

**Per tutti i dettagli riguardanti le modalità di esecuzione delle indagini, ed i relativi risultati, si rimanda alla documentazione resa disponibile richiamata in precedenza e allegata alla presente Relazione di Calcolo (*Relazione Geologico-Tecnica; Grafici prove geotecniche di laboratorio; Sezione geo litologica generale della galleria; Sezione geo litologica della zona di intervento*).**

**Nel seguito si riassumono sinteticamente i dati, estratti dalla suddetta documentazione, che sono stati presi in considerazione nella presente progettazione.**

Nella seguente tabella sono elencati i sondaggi geognostici eseguiti e le prove geotecniche in sito e in laboratorio, ad essi associate.

Sondaggio	[m]	Campioni indisturbati	S.P.T	Piez.Casagrande [m]	Piezometro Corda vibr.[m]	Prova Lefranc	Penetr. Statica	[m]
S1	30,0	4	3	8,2	20,0	-	-	-
S2	23,5	4	4	10,5	-	-	-	-
S3	20,0	3	3	9,8	12,0	-	-	-
S4	22,7	4	4	8,8	14,0	2	-	-
-	-	-	-	-	-	-	PPS1	21,0
-	-	-	-	-	-	-	PPS2	22,8

I provini di terreno estratti dai campioni indisturbati prelevati nei terreni a grana fine hanno consentito di eseguire le prove di laboratorio riportate nella seguente tabella.

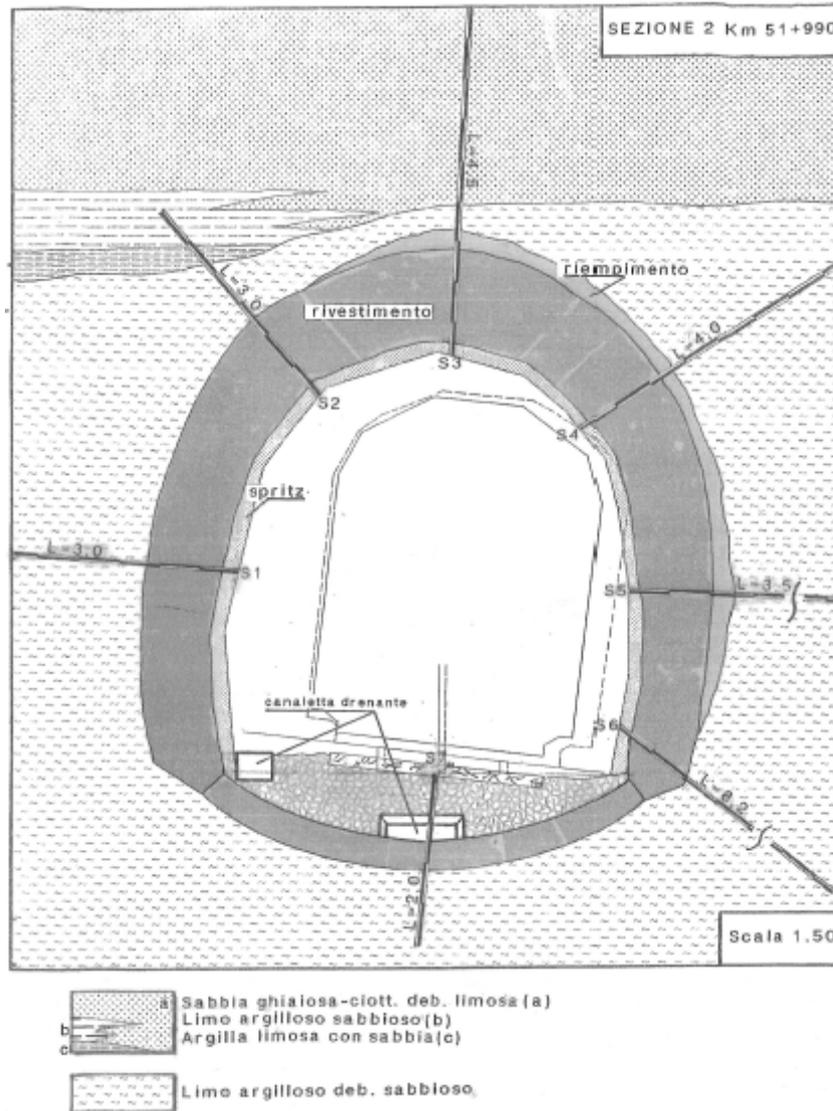
Sondaggio	Granulometria con setacci	Granulometria con aerometro	Limiti	wn	$\gamma$	$\gamma_c$	Taglio diretto C.D.	Taglio dir. C.D. (res)	Triassiale U.U.
S1	4	4	4	4	4	4	2	2	2
S2	4	4	4	4	4	4	3	2	2
S3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
S4	4	4	4	4	4	4	2	2	2

Durante la fase di rilievo della galleria sono state ricostruite n.40 sezioni, in ragione di una ogni 10,00 m, a partire dalla progressiva chilometrica 51+776 (filo imbocco galleria lato Palermo) fino alla progressiva chilometrica 52+162,45 (filo sbocco lato Trapani).

In aggiunta al rilievo del profilo di intradosso delle sezioni di galleria, sono stati eseguiti, internamente, in corrispondenza delle sezioni riportate nella tabella seguente, dei carotaggi che hanno permesso di identificare la costituzione del terreno a tergo del rivestimento della galleria oltre che, naturalmente, la geometria e la natura del rivestimento stesso.

Sezione N.	Progressiva (km)	Sondaggio	[m]	Rilievo endoscopico
2	51+990	S1	3,0	1
"	"	S2	3,0	1
"	"	S3	4,5	1
"	"	S4	4,0	1
"	"	S5	3,5	1
"	"	S6	8,2	1
"	"	S7	2,0	-
3	52+014	S1	2,0	1
"	"	S2	2,0	1
"	"	S3	3,0	1
"	"	S4	2,0	1
"	"	S5	9,0	1
"	"	S6	2,0	1
1	52+041	S1	2,0	1
"	"	S2	3,0	1
"	"	S3	4,0	1
"	"	S4	3,0	1
"	"	S5	2,0	1
"	"	S6	3,0	1
	51+967	D	3,0	1
	52+001	C	7,0	1
	52+026	B	7,0	1
	52+053	A	3,5	1

All'interno dei fori di carotaggio, sono state quindi eseguite delle ispezioni con sonda ottica (Boroscopio), miranti ad evidenziare con maggior precisione le condizioni dell'ammasso roccioso a tergo del rivestimento, e la tecnica di costruzione del rivestimento stesso. Nella figura seguente si riporta, come esempio, lo schema dei carotaggi eseguiti alla pk 51+990 e la ricostruzione geometrica della sezione comprendente le informazioni sia sul rivestimento definitivo sia sulla costituzione del sottosuolo a tergo.



**Figura 3 - pk 51+990 - ricostruzione geometrica della sezione e del terreno a tergo del rivestimento**

#### 4.3.-..CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 2020 - TERRENI

La campagna di indagini geognostiche del 2020 ha compreso:

- ✓ una perforazione di sondaggio (S1Dh), eseguita esternamente alla galleria fino ad una profondità di 32 m circa;
- ✓ n.1 prove penetrometriche dinamiche di tipo Standard Penetration Test (SPT) nei terreni a grana grossa e prelievo di n.4 campioni indisturbati nei terreni a grana fine;
- ✓ Installazione di piezometro tipo Casagrande per il rilievo e monitoraggio della falda freatica.

#### 4.4.-..CAMPAGNA DI INDAGINI ANNO 2020 - STRUTTURE

La campagna di indagine diagnostiche del 2020 ha avuto lo scopo di valutare le condizioni di conservazione delle funzioni strutturali della galleria Spadafora in due sezioni:

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)	
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> <b>SINTAGMA</b> <b>ITALIANA SISTEMI</b> <b>PAGINA</b> <b>66</b> <b>14 /</b>

✓ Sezione 1 alla pk 52+022

✓ Sezione 2 alla pk 52+118

***Nel complesso sono state eseguite le seguenti prove:***

✓ n.4 prove con martinetti piatti singoli;

✓ n.4 prove con martinetti piatti doppi;

✓ n.2 carotaggi in calotta;

✓ n.2 carotaggi su piedritti;

✓ n.2 carotaggi in arco rovescio.

**Per tutti i dettagli riguardanti le modalità di esecuzione delle indagini, ed i relativi risultati, si rimanda alla documentazione resa disponibile richiamata in precedenza e allegata alla presente Relazione di Calcolo.**

**Nel seguito saranno richiamati e riassunti sinteticamente solo i dati, estratti dalla suddetta documentazione, presi in considerazione nella progettazione.**

## 5.-.FASE CONOSCITIVA

### 5.1.-.INQUADRAMENTO LITOLOGICO E STRATIGRAFICO

I sondaggi geognostici eseguiti in esterno alla Galleria Spadafora hanno consentito di conoscere l'assetto litologico e stratigrafico del sottosuolo e di individuare e monitorare la falda idrica, con cui interferisce la galleria, mediante l'installazione di piezometri.

Dall'alto verso il basso, si individuano i seguenti litotipi:

- ✓ **Materiali di copertura recente (terreno agrario, materiale di riporto);**
- ✓ **Detrito di falda;**
- ✓ **Sedimenti marini sabbioso – limoso – arenacei;**
- ✓ **Substrato argilloso – limoso.**

Nella figura seguente si riporta la "Sezione geolitologica generale della Galleria Spadafora". Questo documento, redatto sulla base del rilievo geolitologico di dettaglio di campagna, opportunamente integrato dalla esecuzione di sondaggi geognostici esterni alla galleria, fornisce un quadro sintetico e chiaro dell'assetto geolitologico/stratigrafico dei litotipi all'interno dei quali si sviluppa la galleria e della potenza dei ricoprimenti.

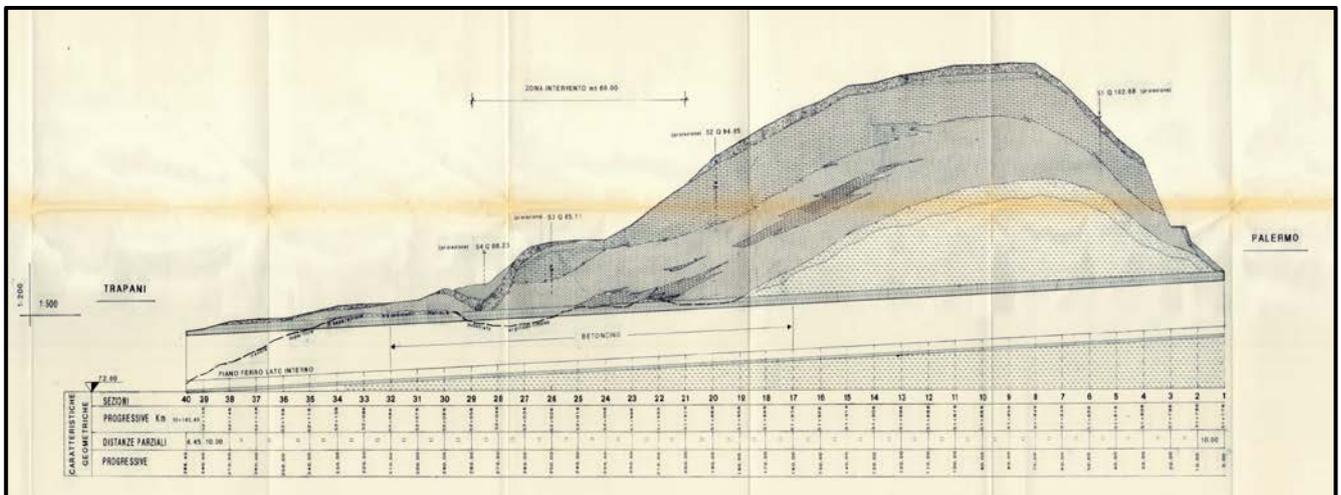


Figura 4 – Sezione geolitologica generale della Galleria Spadafora

Vengono di seguito descritte le principali caratteristiche dei litotipi presenti nel sottosuolo così come riportate nella Relazione Geologico-Tecnica redatta dalla Società italiana di Geofisica nell'ottobre 1993; ad essa si rimanda per tutti i dettagli.

#### MATERIALI DI COPERTURA RECENTE (TERRENO AGRARIO, MATERIALE DI RIPORTO)

*“Con questa definizione vengono indicati i terreni di recente formazione sfruttati e/o originati per fini antropici. Si tratta della coltre di terreno vegetale o agrario utilizzata ai fini agricoli del territorio. Per terreno agrario o vegetale si vuole intendere quella discontinua copertura di suolo, più o meno*

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	
<p>CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b></p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p><b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI</p> <p>PAGINA <b>16 / 66</b></p>

*alterato, che trae origine dall'alterazione, disfacimento e rimaneggiamento del substrato litoide sia sabbioso arenaceo che limoso argilloso.*

*In affioramento il terreno agrario si presenta di spessore disomogeneo oscillante da qualche decimetro a poco più di 1 metro; tessituralmente è costituito prevalentemente da sabbie debolmente limose con poca ghiaia e qualche ciottolo.*

*Con terreno di copertura recente si è voluto indicare anche il materiale di riporto generato dagli sbancamenti e movimenti terra realizzati sia per fini agricoli che edificativi del territorio.*

*In alcune zone, come quella di maggiore interesse presso lo sbocco lato Trapani della Galleria Spadafora, il materiale di riporto assume diffusione e spessori significativi, anche di 2-3 m. Non è possibile distinguere una tessitura o una struttura ben precisa all'interno del materiale di riporto, infatti, granulometricamente esso è estremamente eterogeneo (sabbia, ghiaia, limo e frammenti lapidei eterometrici) ed è ammassato in modo alquanto caotico”.*

#### DETRITO DI FALDA

*“Affiora soprattutto ai piedi delle scarpate morfologiche che generalmente bordano gli affioramenti sabbioso-arenacei che ricoprono il substrato argilloso-limoso, e si estende lungo i versanti in modo più o meno diffuso. Gli spessori maggiori si riscontrano in prossimità delle scarpate per assottigliarsi via via che si procede lungo i versanti passando da oltre 1 m a pochi decimetri. Un notevole spessore di materiale detritico è stato intercettato, nella zona di intervento, di maggior interesse, durante l'esecuzione del sondaggio geognostico esterno denominato S4 (spessore attraversato pari a 4,10 m).*

*Litologicamente è costituito prevalentemente da frammenti lapidei a spigoli vivi e subordinatamente da ciottoli, immersi in una matrice sabbiosa-limosa, talora prevalente. Non è possibile distinguere una struttura stratificata: i detriti appaiono disposti caoticamente e presentano repentine variazioni di granulometria. Geneticamente il materiale detritico deriva dal disfacimento delle testate dei banconi arenaceo-sabbiosi e dal rimaneggiamento delle sottostanti formazioni sabbiose-limose-ghiaiose e limose-argillose”.*

#### SEDIMENTI MARINI SABBIOSO-LIMOSO-ARENACEI

*“Appartengo a questa formazione una serie di litofacies di ambiente marino sottile o di ambiente di transizione, caratterizzate da diverse peculiarità strutturali e tessiturali che rimangono legate da intimi e fitti rapporti eteropici tra le singole litofacies.*

*A questi sedimenti possono essere ascritti sia dei termini tessituralmente arenaceo-conglomeratici, più o meno cementati, che dei termini sabbioso-limoso-ghiaiosi o limosi-sabbiosi-ghiaiosi o*

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	
<p>CODIFICA ELABORATO 304817S01PDTSG48001E015A</p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p>ATI SINTAGMA ITALIANA SISTEMI</p> <p>PAGINA 17 / 66</p>

*prettamente limosi, comprendenti tutte le litofacies di transizione da un litotipo all'altro. Strutturalmente è stata distinta in affioramento una tipica stratificazione da planare a "incrociata", talora molto fitta, in strati o banchi.*

*Schematicamente può affermarsi che i termini più prettamente arenaceo-conglomeratici tendono a sovrastare stratigraficamente le rimanenti litofacies le quali risultano mediamente più diffuse via via che si procede in profondità. A questo quadro schematico fanno eccezione dei singoli livelli arenacei ben cementati che sono stati attraversati durante le fasi di sondaggi poco prima di raggiungere il substrato argilloso di base. Lo spessore complessivo delle varie litofacies ascrivibili ai sedimenti marini di ambiente poco profondo o transizionale, incontrato nel corso dei sondaggi, varia da circa 4,00 metri in corrispondenza del sondaggio esterno S4 a circa 10,5 m in corrispondenza del sondaggio esterno S2."*

#### SUBSTRATO ARGILLOSO-LIMOSO

*"Questa litofacies, fatta eccezione per limitati lembi, non è direttamente osservabile in affioramento poiché appare generalmente ricoperta da un modesto spessore detritico/colluviale che la oblitera. La sua presenza è però avvertibile laddove la morfologia diventa meno aspra e più ondulata, nella zona a Nord e Nord-Est della linea ferrata o in direzione dello sbocco lato Palermo. Si tratta di sedimenti marini in prevalente facies argillosa-limosa talora debolmente sabbiosa, cui si intercalano sporadicamente, dei livelletti millimetrici di sabbia fine. Anche in questo caso si tratta di sedimenti marini, però di ambiente più profondo rispetto alle facies mediamente più grossolane che li ricoprono.*

*Le argille limose di base sono state incontrate sia nel corso dei sondaggi esterni sia nel corso dei sondaggi interni alla galleria. Lo spessore massimo indagato è di circa 22,00 m in corrispondenza del sondaggio S1. All'interno di questa litofacies è possibile osservare una struttura stratificata."*

#### 5.2.-.INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Vengono di seguito descritte le principali caratteristiche idrogeologiche dei litotipi presenti nel sottosuolo così come riportate nella Relazione Geologico-Tecnica redatta dalla Società italiana di Geofisica nell'ottobre 1993; ad essa si rimanda per tutti i dettagli.

- **Terreni permeabili per porosità e fessurazione:** *"Ai terreni permeabili per porosità e fratturazione può essere ascritta la facies sabbioso arenacea che compone i Sedimenti Marini...Nel complesso a questo litotipo è possibile attribuire un grado di permeabilità elevato variabile da  $k=10^{-3}$  cm/sec (facies a grana grossolana, molto fratturate) a  $k=10^{-4}$  cm/sec (facies a grana medio-fine poco fratturate). In particolare, durante la fase di esecuzione della prova di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile, condotta alla profondità di 8,50 m dal p.c., nella*

*facies arenaceo sabbiosa presente all'interno del sondaggio esterno S4, è stato riscontrato il seguente coefficiente di permeabilità:  $k=4,36 \times 10^{-3}$  cm/sec”.*

- **Terreni permeabili per porosità:** *“Ai terreni permeabili per porosità possono essere ascritte le facies che vanno dalla sabbiosa alla sabbioso-limoso-ghiaiosa alla limosa, ecc. che compongono sia i Sedimenti Marini che il litotipo detritico. L'estrema variabilità granulometrica che caratterizza le suddette litofacies, influenza direttamente il grado di permeabilità il quale varia seguendo i fitti rapporti eteropici riscontrati. Oscillando, quindi, sia verticalmente che orizzontalmente. Alla luce di quanto affermato non è possibile individuare un coefficiente di permeabilità unitario per i terreni permeabili per porosità, infatti esso oscillerà in un range di valori così quantizzabili:*

- *sabbia e sabbia-ghiaiosa con poco limo:*  $k = 10^{-3} - 10^{-4}$  cm/sec
- *sabbia-limosa e limo-sabbioso-ghiaioso:*  $k = 10^{-4} - 10^{-5}$  cm/sec
- *limo e limo argilloso-sabbioso;*  $k = 10^{-4} - 10^{-5}$  cm/sec

*In particolare, durante la fase di esecuzione della prova di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile, condotta alla profondità di 5,50 m dal p.c., nella facies detritica sabbiosa-ghiaiosa-ciottolosa presente all'interno del sondaggio esterno S4, è stato riscontrato il seguente coefficiente di permeabilità:  $k=8,08 \times 10^{-3}$  cm/sec”.*

- **Terreni poco permeabili o impermeabili, per porosità:** *“Questo tipo di permeabilità è quella che caratterizza, nel complesso, il substrato argilloso-limoso attraversato durante i lavori dai sondaggi geognostici. Ai fini della permeabilità non vengono considerati i singoli livelletti o orizzonti di sabbia fine, che rimangono inclusi nelle argille-limose, infatti essi hanno uno sviluppo spaziale di tipo lenticolare estremamente ridotto. Ai terreni poco permeabili o impermeabili per porosità può attribuirsi, indicativamente, il seguente coefficiente di permeabilità:  $k=10^{-7}$  cm/sec”.*

In merito alle modalità di circolazione delle acque sotterranee dalla Relazione Geologico-Tecnica si apprende che *“...le acque di precipitazione, dopo aver permeato la copertura costituita dal terreno agrario o di riporto e dal materiale detritico, tendono ad infiltrarsi nei litotipi che costituiscono i “Sedimenti Marini di acque poco profonde” (arenarie sabbioso conglomeratiche, sabbia-ghiaiosa-limosa, sabbia-limosa, limo-sabbioso-argilloso, ecc.) caratterizzati da buona o elevata permeabilità per porosità e/o porosità e fessurazione.*

*Le acque di infiltrazione tendono così a muoversi, mobilitate dalla forza di gravità, anche in direzione dell'asse della galleria in questione.*

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)	
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI

 PAGINA  
 19 /  
 66

*La dinamica di deflusso delle acque sotterranee, all'interno dei litotipi sedimentari marini di acque poco profonde, risulta comunque, facilmente intuibile e riferibile ad un modello idrogeologico costituito da una serie di acquiferi lentiformi giustapposti e/o sovrapposti, tutti caratterizzati da reciproco rapporto di continuità idrogeologica, ma da diverso grado di permeabilità.*

*Complessivamente, i sedimenti marini poco profondi, possono essere considerati un **acquifero superiore unitario**, all'interno del quale le acque di infiltrazione si muovono soprattutto verticalmente, spinte dalla forza di gravità.*

***Raggiunta la base dell'acquifero superiore, le acque di infiltrazione tendono così a muoversi orizzontalmente condizionate dall'andamento spaziale del substrato argilloso-limoso impermeabile di base.***

***La Galleria Spadafora, non fa altro che intercettare, lungo il suo sviluppo, la zona di contatto tra acquifero superiore e substrato impermeabile, fungendo così da struttura drenante.***

***Questa condizione è stata evidenziata soprattutto attraverso la esecuzione dei carotaggi interno alla galleria, i quali hanno messo in risalto che la zona in calotta della galleria si muove circa al contatto tra acquifero in falda e substrato impermeabile, talora penetrando all'interno dell'acquifero in falda in modo significativo (sez.1 in corrispondenza del km 52+041). Questa condizione non si verifica per tutto lo sviluppo della galleria ma soprattutto a partire dal km 51+996 fino al km 52+066 circa.***

*Evidenze di una circolazione idrica sotterranea nell'area in studio, sono state osservate sia ispezionando la Galleria Spadafora (all'interno della quale sono stati eseguiti anche dei carotaggi) che all'esterno durante la fase di esecuzione dei sondaggi geognostici.*

*In particolare, per il controllo della falda freatica, durante la fase di esecuzione dei sondaggi geognostici esterni, sono stati installati dei piezometri.*

*Al contatto tra acquifero superiore e substrato impermeabile sono stati installati dei piezometri tipo Casagrande, ciò per misurare le oscillazioni del carico idraulico immediatamente al di sopra della calotta della galleria.*

*I dati piezometrici emersi fino alla data del 27/10/1993 sono i seguenti:*

sondaggio	pizometro tipo	profondita' di installazione	livello alla 1 <sup>a</sup> lettura 30/09/93	livello alla 2 <sup>a</sup> lettura 27/10/93	variazione
S1	Casagrande	8,20 m	8,00 m	7,90 m	+0,10 m
S2	"	10,50 m	10,40 m	/	/
S3	"	9,80 m	9,20 m	7,90 m	+1,30 m
S4	"	8,80 m	8,00 m	7,80 m	+0,20 m

*Dalla tabella si evince che si sono avuti degli incrementi significativi del livello della falda freatica, soprattutto nella zona in cui sono stati eseguiti i sondaggi S3 e S4. L'incremento si è verificato subito dopo il manifestarsi, di eventi piovosi particolarmente intensi. Ciò evidenzia che l'acquifero in questione, di tipo areato, risente in modo repentino degli afflussi dovuti alla infiltrazione superficiale, infatti l'acquifero in questione è a diretto contatto con l'atmosfera ed ha uno spessore esiguo (al massimo circa 10 m) ...".*

I terreni sovrastanti la calotta sono pertanto sede di una falda freatica direttamente e repentinamente influenzata dai locali eventi meteorici. In tal senso, lo spessore della falda varia continuamente nell'arco dell'anno, aumentando in coincidenza della stagione piovosa. Naturalmente, con il livello della falda varia il carico idraulico agente sul rivestimento della galleria; tuttavia, al di sopra della calotta, la falda tende comunque a deprimersi poiché captata dalla galleria stessa.

### 5.3.-. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Nel seguito si richiamano sinteticamente i risultati della caratterizzazione geotecnica basata sui risultati delle indagini geotecniche in sito (terreni a grana grossa) e di laboratorio (terreni a grana fine) di interesse ai fini dello svolgimento delle analisi di progetto e delle verifiche di sicurezza. I dati sono stati estratti dalla Relazione Geologico-Tecnica redatta dalla Società Italiana di Geofisica; ad essa si rimanda per tutti i dettagli.

#### PROVE SPT – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI "SEDIMENTI MARINI SUPERIORI"

*"Nel corso dei sondaggi geognostici esterni, sono state esperite, per la caratterizzazione geotecnica dei terreni sedimentari marini incoerenti, sovrastanti la facies argilloso-limosa, n.14 prove SPT alle profondità indicate nei moduli stratigrafici. Delle n.14 prove eseguite, è stato possibile elaborare i dati per sole n.8 prove; le rimanenti sei sono state scartate perché sono andate "a rifiuto" o perché sono state eseguite in litotipi prevalentemente limosi già analizzati mediante prove geotecniche di laboratorio".*

Per tutti i dettagli sulle modalità di esecuzione ed elaborazione delle prove si rimanda alla Relazione Geologico-Tecnica allegata; nel seguito si riportano i risultati della caratterizzazione geotecnica delle facies litoidi prevalentemente sabbiose, sciolte, costituenti una parte delle componenti granulometriche dei “sedimenti marini superiori” e la facies detritico colluviale di copertura:

FACIES DETRITICA:	Dr [%]	= 33.9 ÷ 55.0
	$\varphi$ [°]	= 30.2 ÷ 33.4
	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 263 ÷ 348
FACIES SABBIOSA:	[%]	= 58.5 ÷ 66.5
	$\varphi$ [°]	= 34.2 ÷ 36.3
	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 225 ÷ 421
FACIES SABBIOSA-LIMOSA:	Dr [%]	= 46.1 ÷ 60.7
	$\varphi$ [°]	= 35.0 ÷ 35.5
	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 98 ÷ 108

PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA FORMAZIONE DI BASE

*“Nel corso dei sondaggi esterni alla Galleria Spadafora sono stati prelevati, allo scopo di condurre delle prove geotecniche di laboratorio, n.15 campioni indisturbati nei litotipi coesivi attraversati nelle fasi di carotaggio. Dei campioni prelevati n.2 sono rappresentativi della facies costituita dai sedimenti marini di mare poco profondo che sovrastano le argille limose di base. I rimanenti n.13 campioni sono tutti rappresentativi delle argille limose di base.”*

Nel seguito i risultati della caratterizzazione geotecnica della **facies argilloso limosa di base**:

- Terre a grana fine ricadenti nel campo delle argille inorganiche di alta plasticità (CH, WL>50). Parametri di resistenza al taglio caratterizzati da valori medio-alti
- Taglio diretto C.D.
 

$c'$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 0.46 ÷ 0.60
$\varphi'$ [°]:	= 17 ÷ 19
- Resistenza residua
 

$c'r$ [kg/cm <sup>2</sup> ]:	= 0.06 ÷ 0.12
$\varphi'r$ [°]:	= 9 ÷ 10
- Triassiale U.U.
 

cu [kg/cm <sup>2</sup> ]:	= 0.81 ÷ 1.12
$\varphi_u$ [°]:	= 0

Infine si riportano i risultati della caratterizzazione geotecnica della facies **facies limosa dei sedimenti marini superiori** (C.I. 6,00-6,50 si S2 e 9,20-9,70 di S3)

➤ Terreni a grana medio fine ricadenti nel campo delle argille inorganiche di media plasticità (CL, WL<50). Parametri di resistenza al taglio caratterizzati da valori medio bassi:

➤ Taglio diretto C.D.	$c'$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 0.18 ÷ 0.40
	$\varphi'$ [°]	= 15 ÷ 17
➤ Resistenza residua	$c'r$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 0.00
	$\varphi'r$ [°]	= 8
➤ Triassiale U.U.	$c_u$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	= 0.46
	$\varphi_u$ [°]	= 0

#### 5.4.-..MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO

Come detto, la presente Relazione di Calcolo concerne il consolidamento strutturale della Galleria Spadafora nella tratta compresa tra il km 51+950 ed il km 52+162,45 (sbocco lato Trapani).

Nelle analisi svolte il tratto in esame è stato suddiviso nei seguenti subtratti in funzione delle coperture presenti:

- sezioni con copertura  $C < 6$  m: da pk 52+162,45 (sbocco lato Trapani) a pk 52 + 006;
- sezioni con copertura  $6 < C < 14$  m: da pk 52 + 006 a pk 51 + 950 (limite intervento);

**Il modello geotecnico di sottosuolo utilizzato nelle analisi è stato definito a partire dalla sezione Geolitologica Generale della GA e dalle sezioni trasversali alla galleria effettuate in corrispondenza dei sondaggi geognostici esterni S2, S3 ed S4 (vedi fig. seguenti).**

**Schematicamente, nelle analisi, si è considerato il seguente modello di sottosuolo, costituito da due facies:**

- **Superficiale**, estesa dal piano campagna fino ad una quota prossima alla quota di chiave calotta, costituita dalla *facies dei sedimenti marini superiori* precedentemente descritti e caratterizzati mediante indagini in sito di tipo SPT.
- **Profonda**, presente a profondità maggiori della quota di chiave calotta, costituita dalla *facies argilloso-limosa di base* precedentemente descritta e caratterizzata mediante prove di laboratorio.

Nel modello geotecnico di sottosuolo, nella formazione superficiale costituita dalla *facies dei sedimenti marini superiori*, non è stata considerata la presenza della falda freatica. Si assume quindi che l'acquifero sia drenato e le acque siano allontanate dai terreni sovrastanti la galleria.

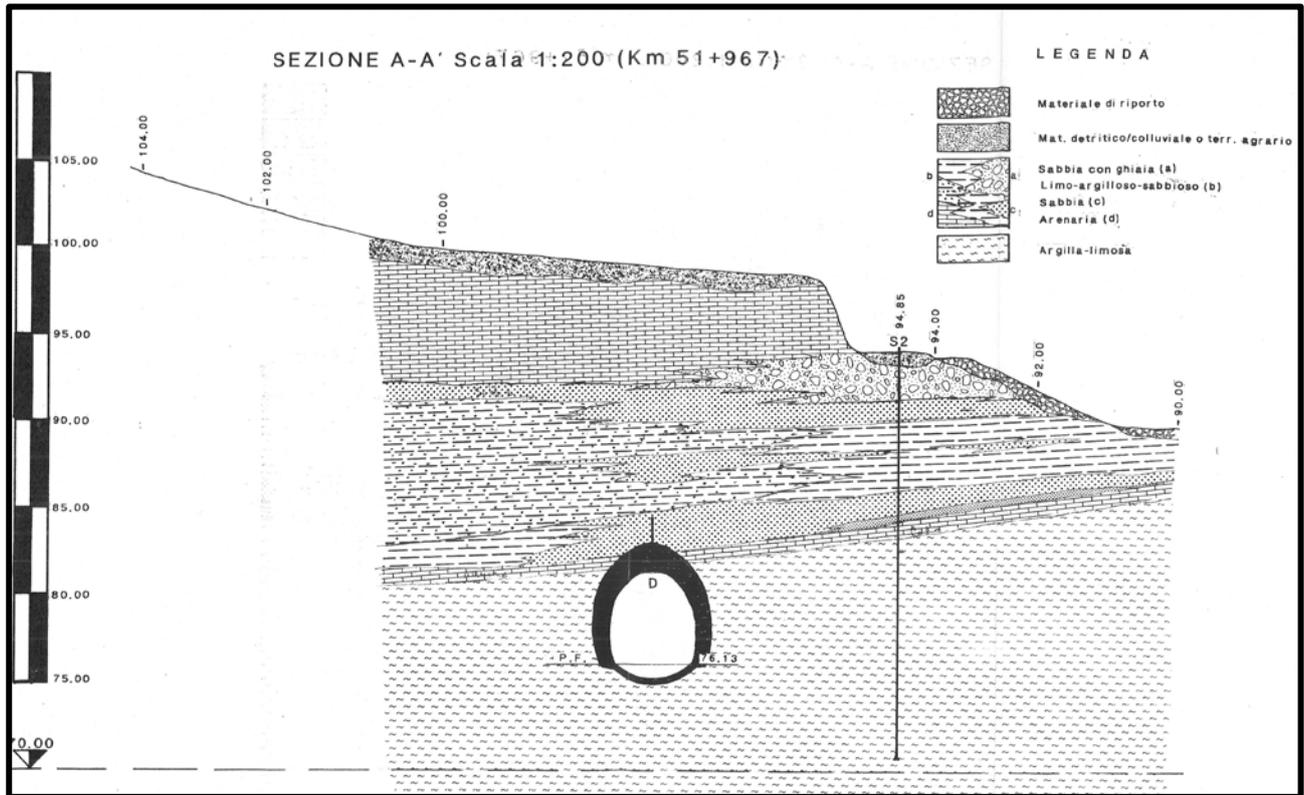


Figura 5 – Sezione trasversale alla pk 51+976

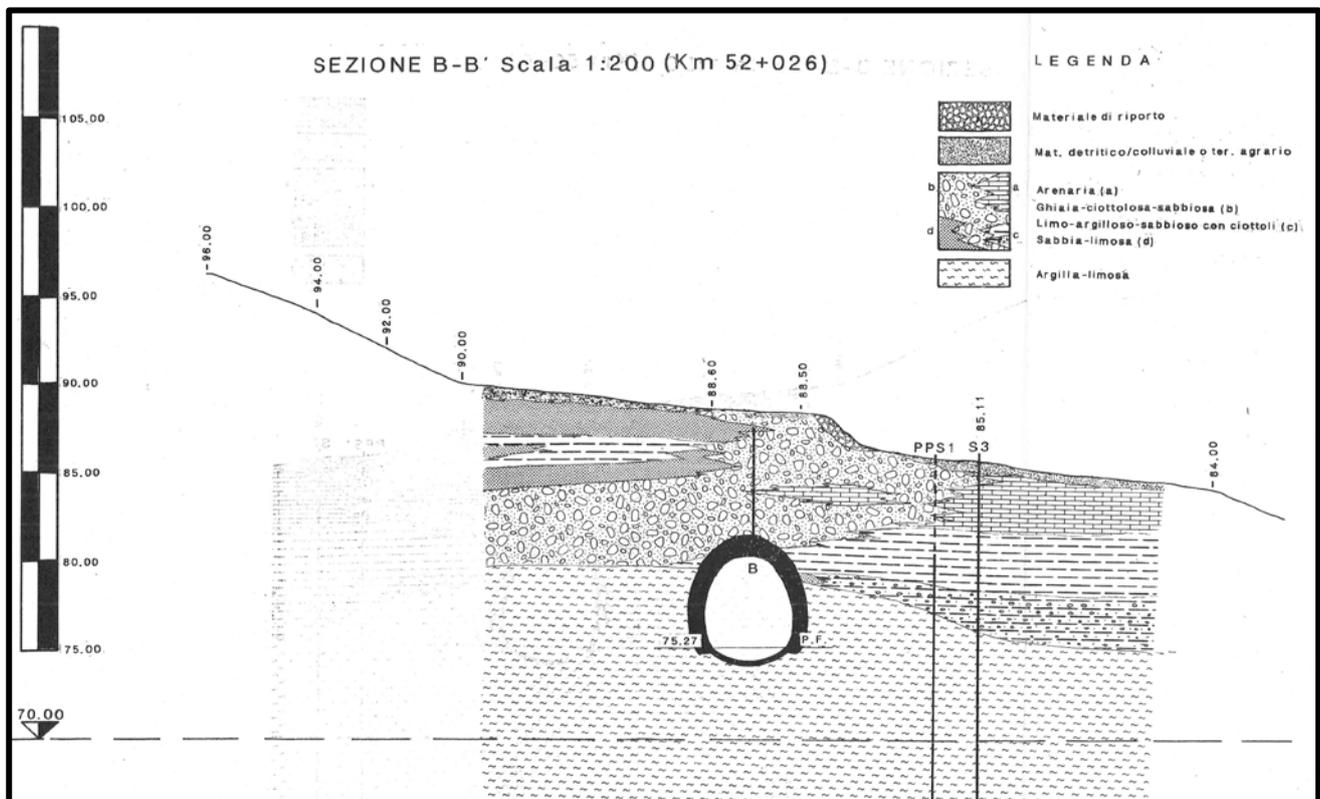


Figura 6 – Sezione trasversale alla pk 52+026

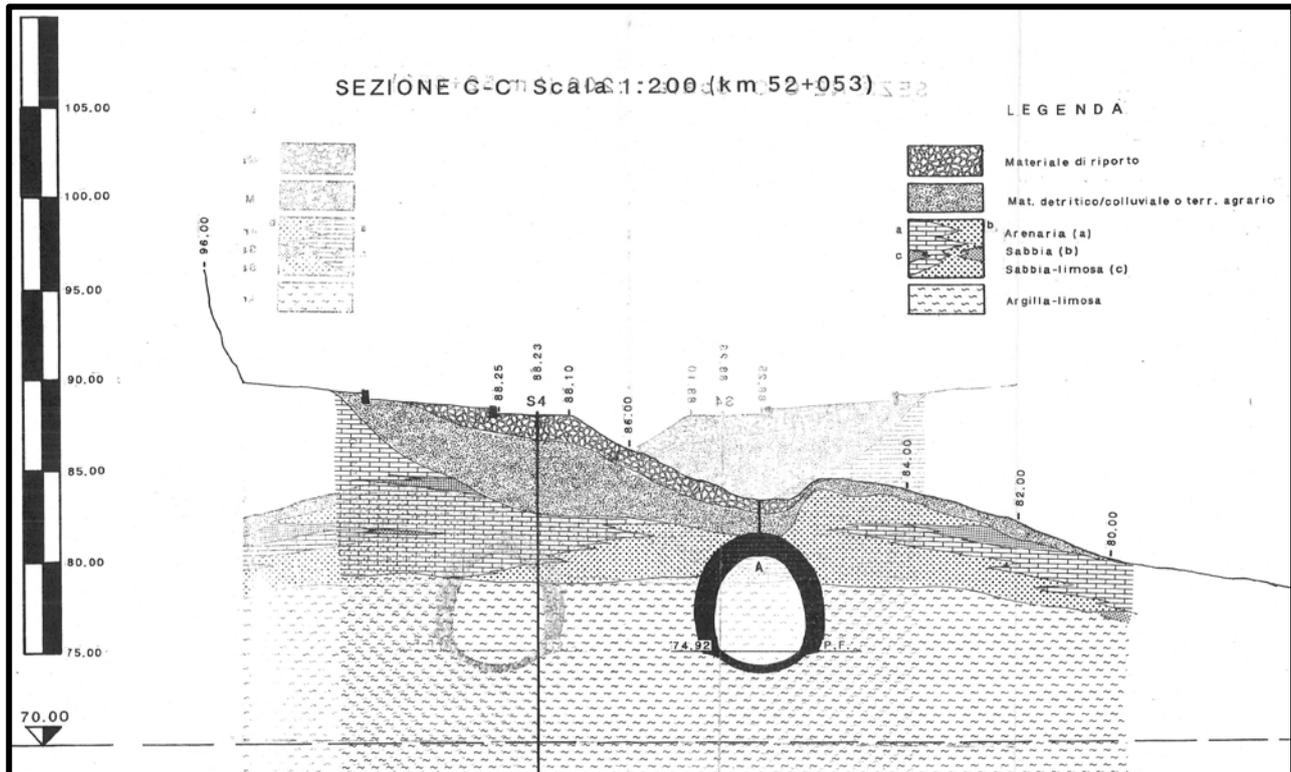


Figura 7 – Sezione trasversale alla pk 52+053

#### 5.5.-..STRUTTURE - LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Le indagini finalizzate al rilievo geometrico del rivestimento definitivo della Galleria Spadafora hanno compreso il rilievo del profilo di intradosso delle sezioni di galleria in ragione di una sezione ogni 10 m, lungo l'intero sviluppo della galleria, ed inoltre carotaggi interni associati ad indagini endoscopiche, eseguiti con sistematicità nella zona di intervento; questo ha consentito di avere una opinione chiara sulla morfologia e qualità delle murature, sia in superficie che nello spessore murario: ***in relazione al grado di approfondimento raggiunto le indagini di rilievo possono considerarsi esaustive.***

Le indagini finalizzate alla caratterizzazione meccanica del rivestimento definitivo della Galleria Spadafora hanno compreso indagini visive, diffuse e sistematiche, accompagnate da approfondimenti locali. Sono stati inoltre eseguiti saggi estesi, sia in superficie sia nello spessore murario (anche con endoscopie), mirati alla conoscenza dei materiali e della morfologia interna della muratura. Infine sono state eseguite prove dirette sui materiali, con martinetti doppi, per determinarne il modulo di deformabilità e la resistenza a compressione: ***in relazione al grado di approfondimento raggiunto le indagini di caratterizzazione meccanica possono considerarsi esaustive.***

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO</p>	<p>ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)''</p>	
<p>CODIFICA ELABORATO 304817S01PDTSG48001E015A</p>	<p>TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA –RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO</p>	<p>ATI SINTAGMA ITALIANA SISTEMI</p> <p>PAGINA 25 / 66</p>

Ai sensi del §C.8.5.4 della *Circolare* si intende raggiunto un livello di conoscenza LC3: il corrispondente fattore di confidenza per cui dividere i valori medi delle resistenze e dei moduli elastici della muratura è **FC=1**.

#### 5.6.-..GEOMETRIA E PROPRIETÀ DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

Le informazioni sulla geometria e sulle proprietà meccaniche del rivestimento definitivo della Galleria Spadafora sono state desunte dalla seguente documentazione:

- ✓ carotaggi interni alla galleria, ed indagini endoscopiche associate, eseguiti nel corso della campagna di indagini dell'anno 1993;
- ✓ carotaggi interni alla galleria eseguiti nel corso della campagna di indagini diagnostiche dell'anno 2020;
- ✓ prove in situ di compressione con martinetti piatti doppi eseguite nel corso della campagna di indagini diagnostiche dell'anno 2020.

Nel seguito si riportano i risultati della elaborazione delle prove elencate. Per tutti i dettagli sulle modalità di esecuzione delle indagini e sui relativi risultati si rimanda alla Relazione Geologico Tecnica redatta dalla Società Italiana di Geofisica nell'ottobre 1993 ed al rapporto di prova n°66811 del 18/03/2020 redatto dalla Geolab s.r.l. nel marzo 2020.

#### GEOMETRIA DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

Il rivestimento della Galleria è costituito, procedendo dall'intradosso verso l'estradosso, da:

- ✓ uno strato di spritz beton armato con doppio strato di rete elettrosaldata, di spessore variabile da 12 a 18 cm;
- ✓ una muratura costituita da conci e blocchi arenacei cementati con malta magra, il cui spessore rilevato è variabile da 58 (in una sola sezione, molto probabilmente per un difetto di costruzione) a 125 cm.

In seguito alla elaborazione (riportata in allegato) dei risultati dei carotaggi eseguiti all'interno della galleria, e delle indagini endoscopiche ad essi associate, si è osservato che gli spessori misurati con le indagini endoscopiche (limitate alle sezioni di calotta e piedritti) risultano mediamente inferiori del 20% rispetto ai corrispondenti valori rilevati con i carotaggi.

Facendo riferimento quindi alle indagini endoscopiche, si è stimato, per il rivestimento definitivo di calotta, uno sp. medio di 90 cm; mentre per l'arco rovescio si è stimato uno spessore di 40 cm.

#### PROPRIETÀ MECCANICHE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

La muratura del rivestimento definitivo, in base ai risultati delle indagini, è assimilabile, con riferimento alla Tabella C.8.5.I della *Circolare*, alla tipologia muraria definita "*Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)*".

Nella seguente tabella si riportano, per la tipologia muraria suddetta, gli intervalli di variazione, ed i valori medi, delle caratteristiche fisiche, e dei parametri di resistenza e deformabilità così come indicati nella Tabella C.8.5.I della *Circolare*.

Tipologia muraria (Tab.C.8.5.I)	"Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)"	
Intervallo di variazione	Valore medio	
$2,0 < f < 3,2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,6 [N/mm <sup>2</sup> ]	
$0,04 < \tau_0 < 0,08$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,06[N/mm <sup>2</sup> ]	
$0,10 < f_{v0} < 0,19$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,145[N/mm <sup>2</sup> ]	
$1200 < E < 1620$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1410 [N/mm <sup>2</sup> ]	
$400 < G < 500$ [N/mm <sup>2</sup> ]	450 [N/mm <sup>2</sup> ]	
$13 < w < 16$ [kN/m <sup>3</sup> ]	14,50 [kN/m <sup>3</sup> ]	

in cui:

- $f$  = resistenza media a compressione;
- $\tau_0$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali;
- $f_{v0}$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali;
- $E$  = valore medio del modulo di elasticità normale;
- $G$  = valore medio del modulo di elasticità tangenziale;
- $w$  = peso specifico medio

Nella seguente tabella si riportano i risultati ottenuti nel corso delle prove di compressione con martinetti doppi:

Ubicazione	Tipologia muraria	Sigla	Modulo deformabilità ciclo 1 - Mpa]	Tensione massima [daN/cm <sup>2</sup> ]
km 52+022	Conci di calcarenite squadri	MD1DX-DIR.TP	1702	19,2
km 52+022	Conci di calcarenite squadri	MD1SX-DIR.TP	1623	19,2
km 52+118	Conci di calcarenite squadri	MD2SX-DIR.TP	1451	19,2
km 52+118	Conci di calcarenite squadri	MD2DX-DIR.TP	1650	19,2

Considerando i valori medi degli intervalli di variazione, di  $E$  e di  $f$ , riportati in precedenza, si calcola:

$$\frac{f}{E} = \frac{2,6}{1410} = 0,0018$$

Assumendo che il rapporto  $f/E$  sia costante, a partire dai valori del modulo di deformabilità misurati nel corso delle prove, si ottengono le quattro misure indirette di resistenza a compressione riportate nella tabella seguente.

$E$	$f$
-----	-----

[MPa]	[MPa]
1702	3,14
1623	2,99
1451	2,68
1650	3,04

Ai sensi del § C8.5.4.1 della Circolare, per il livello di conoscenza raggiunto (LC3), i valori delle resistenze e dei moduli elastici riportati in Tabella C.8.5.I individuano una distribuzione a-priori che può essere aggiornata sulla base dei risultati delle misure eseguite in sito.

A tal fine, considerando l'equazione C.8.5.4.3 della Circolare è possibile stimare i valori medi aggiornati del modulo di deformabilità e della resistenza a compressione della muratura come segue.

Il valore medio aggiornato  $E''_m$  del modulo di deformabilità vale:

$$E''_m = \frac{nE_m + kE'_m}{n + k} = 1552,91 \text{ MPa}$$

Dove :

- $n = 4$  è il numero di prove;
- $E_m = 1606,5 \text{ MPa}$  è valore medio di  $E$  stimato nelle  $n.4$  prove;
- $k = 1,5$  coefficiente per l'aggiornamento del valore medio di  $E$  riportato in Tab. C.8.III – Circ.;
- $E'_m = 1410 \text{ MPa}$  è il valore medio di  $E$  riportato nella tabella C.8.5.I della Circolare.

Il valore medio aggiornato  $f''_m$  della resistenza a compressione vale:

$$f''_m = \frac{nf_m + kf'_m}{n + k} = 2,81 \text{ MPa}$$

in cui:

- $n = 4$  è il numero di prove;
- $f_m = 2,81 \text{ MPa}$  è valore medio di  $f$  stimato nelle  $n.4$  prove;
- $k = 3$  è un coefficiente per l'aggiornamento dei valori medi dei parametri meccanici riportato nella Tabella C.8.III della Circolare;
- $f'_m = 2,6 \text{ MPa}$  è il valore medio di  $f$  riportato nella tabella C.8.5.I della Circolare.

## 6.-..DIMENSIONAMENTO DEGLI INTERVENTI

### 6.1.-..CRITERI DI PROGETTO

Ai sensi del D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018 (*“Aggiornamento delle Norme Tecniche sulle Costruzioni”*) e della relativa circolare esplicativa (C.S.LL.PP n°7 del 21/02/2019), le analisi di progetto, e le verifiche di sicurezza, sono state svolte secondo il metodo semi-probabilistico agli stati limite.

GALLERIE - STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

La condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove con  $E_d$  si indica il valore di progetto delle azioni, o degli effetti delle azioni, e con  $R_d$  il valore di progetto delle resistenze (NTC18 §2.6.1), è stata verificata per i seguenti stati limite ultimi (SLU) di tipo strutturale (STR):

❖ raggiungimento della resistenza strutturale del rivestimento definitivo (STR).

Ai sensi del §6.7.5 delle NTC18 le verifiche agli stati limite ultimi, per le gallerie, devono essere eseguite con l'Approccio 1, considerando le due combinazioni di coefficienti

✓ **Combinazione 1 : (A1+M1+R1)**

✓ **Combinazione 2 : (A2+M2+R2)**

Con i valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II delle NTC18 e con i coefficienti  $\gamma_r$  dei gruppi R1 e R2 pari all'unità.

**In particolare, le verifiche strutturali del rivestimento definitivo della galleria, sono state eseguite, come specificato al § 6.2.4.1.3 delle NTC18: sono state eseguite le analisi con i valori caratteristici dei parametri geotecnici (M1) ed è stato amplificato l'effetto delle azioni con i coefficienti parziali del gruppo A1; sono stati infine considerati i coefficienti  $\gamma_r$  del gruppo R1 pari all'unità.**

PALI DI FONDAZIONE - STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

La condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove con  $E_d$  si indica il valore di progetto delle azioni, o degli effetti delle azioni, e con  $R_d$  il valore di progetto delle resistenze (NTC18 §2.6.1), è stata verificata per i seguenti stati limite ultimi (SLU) di tipo geotecnico (GEO) e strutturale (STR):

✓ **collasso per carico limite nei riguardi dei carichi assiali (GEO);**

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)					
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>PAGINA</td> <td>29 /</td> </tr> <tr> <td></td> <td>66</td> </tr> </table>	PAGINA	29 /		66
PAGINA	29 /					
	66					

- ✓ **raggiungimento della resistenza strutturale dei pali (STR);**
- ✓ **raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali (STR).**

Ai sensi del §6.4.3.1 delle NTC18 le suddette verifiche devono essere effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione (A1+M1+R3), tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II, 6.4.II.

Nelle verifiche nei confronti di SLU di tipo strutturale, il coefficiente  $\gamma_R$  non deve essere portato in conto.

### 6.2.-..ANALISI DEI CARICHI

Nel seguito si descrivono le azioni considerate nelle analisi.

AZIONI DOVUTE PESO PROPRIO DEL RIVESTIMENTO - CARICHI PERMANENTI STRUTTURALI (G1)

Le forze di massa dovute al peso proprio del rivestimento definitivo della galleria, sono state definite a partire dalle geometrie rilevate con indagini endoscopiche, ed applicando il valore medio,  $w = 14,5 \text{ kN/m}^3$ , del peso per unità di volume riportato in Tabella C.8.5.I della Circolare per la Tipologia muraria definita "Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)".

AZIONI DOVUTE AL TERRENO - CARICHI PERMANENTI NON STRUTTURALI (G2)

Si considerano carichi permanenti non strutturali (G2) agenti il peso del terreno che interagisce con la galleria e le azioni che da esso derivano. Il carico dovuto al peso dei ricoprimenti, in accordo con quanto indicato nel *manuale di progettazione*, è stato calcolato come descritto nel seguito:

- **Sezioni galleria copertura  $C < 6 \text{ m}$  (diam. equivalente):**  
**Da Progr 52+162,45 (sbocco lato Trapani) a Progr 52+006 c.a.:** si è considerato, come carico verticale agente sul rivestimento, nella zona di calotta, l'intero carico geostatico;
- **Sezioni galleria coperture  $C > 6 \text{ m}$  (diam. equivalente):**  
**Da Progr 52+006 a Progr. 51+950 (limite zona intervento):** Il carico verticale  $p_v$  agente in estradosso calotta è stato calcolato con la formula di Terzaghi (1943):

$$p_v = \frac{B(\gamma - \frac{2c}{B})}{2Ktg\phi} \left( 1 - e^{-\frac{2KHtg\phi}{B}} \right)$$

in cui:

- $B = 13,35 \text{ m}$  è la larghezza caratteristica della galleria  $B = b + 2 h \text{ tg}(45 - \phi / 2)$  ;
- $b = 6,20 \text{ m}$  è la larghezza della galleria
- $h = 6,75 \text{ m}$  è l'altezza della galleria;
- $\gamma = 19,6 \text{ kN/m}^3$  è il peso per unità di volume del terreno;
- $c = 0$  è la coesione del terreno secondo il criterio di Mohr-Coulomb;

- $\varphi = 34,2^\circ$  è l'angolo d'attrito del terreno secondo il criterio di Mohr-Coulomb;
- $H$  è la copertura della galleria (variabile);
- $k = 1 - \text{sen}(\varphi) = 0,44$  è il coefficiente di spinta a riposo dei Sedimenti marini superiori;

Il carico orizzontale  $p_h$  è stato assunto proporzionale al carico verticale  $p_v$  con la seguente espressione:

$$p_h = k_0 p_v$$

in cui il coefficiente di spinta  $k_0$  è stato assunto coincidente con il coefficiente di spinta a riposo della formazione argillosa di base.

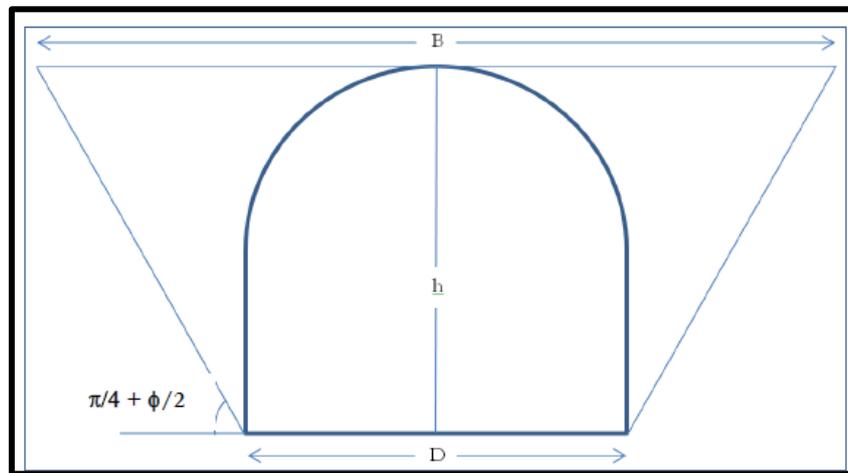


Figura 8 – Definizione dei fattori utilizzati nella formula di Terzaghi (1943)

Nella determinazione dei carichi  $p_v$  e  $p_h$ :

- ✓ il valore medio del peso per unità di volume del terreno è stato stimato pari a  $\gamma=19,6 \text{ kN/m}^3$  in base ai risultati delle analisi di laboratorio condotte sui campioni di terreno prelevati dalla *facies limosa dei Sedimenti marini superiori*;
- ✓ Il valore dell'angolo di attrito è stato assunto coincidente con il valore minimo stimato per la *facies sabbiosa dei Sedimenti marini superiori*;
- ✓ Il valore del coefficiente di spinta a riposo  $k_0$ , stanti le incertezze sul grado di sovraconsolidazione dei terreni, è stato calcolato con la seguente espressione:

$$k_0 = 1 - \text{sen } \varphi = 0,69$$

in cui per l'angolo d'attrito del terreno si è utilizzato il valore medio  $\varphi = 18^\circ$  ottenuto dalle prove di taglio diretto in condizioni drenate su provini estratti da campioni prelevati dalla formazione argillosa di base.

AZIONI DOVUTE ALL'ACQUA - CARICHI VARIABILI Q

Come anticipato, al di sopra della calotta, la falda tende a deprimersi poiché captata dalla galleria stessa. Per questo motivo il carico idraulico sulla calotta si assume pari a zero.

### 6.3.-..COEFFICIENTI DI SOTTOFONDO PER L'ANALISI TERRENO-STRUTTURA

Nell'analisi sono state considerate le reazioni del terreno agenti sia in direzione normale che tangente all'asse degli elementi strutturali del rivestimento definitivo della galleria.

Il valore del coefficiente di reazione del terreno in direzione normale è stato stimato con la seguente espressione di letteratura (Viggiani, 1999):

$$Kn = K1 \left( \frac{B + b}{2B} \right)^2$$

in cui:

- ✓ B è la larghezza della fondazione (arco rovescio e piedritti) pari a circa 6,60 m;
- ✓ b = 30 cm è la larghezza della piastra standard di prova;
- ✓ K1 è il valore di K determinato in prova di carico su piastra standard.

Dai risultati delle prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche e delle proprietà indice della formazione argillosa di base si apprende che le argille in esame sono caratterizzate da valori dell'indice di consistenza prossimi all'unità; esse sono riguardabili pertanto come argille da "moderatamente consistenti" a "consistenti" (Viggiani, 1999). Inoltre, i risultati delle prove di laboratorio di triassiali di tipo U.U, forniscono, per la formazione argillosa di base, un valore di coesione non drenata *cu* compreso nell'intervallo 0,81÷1,12 kg/cm<sup>2</sup>, tipico di un'argilla da *compatta a molto compatta*.

In virtù di quanto esposto in precedenza si è assunto un valore di *k1* = 37, 5 (Viggiani, 1999) e si è stimato un valore di *k* = 1 kg/cm<sup>3</sup>.

Lo stesso valore del coefficiente di sottofondo in direzione normale alla struttura *Kn* si sarebbe calcolato con la seguente espressione suggerita dal *Manuale di progettazione*:

$$Kn = E / [R_{eq} (1-\nu)]$$

assumendo:

*E* = modulo di deformabilità del terreno = 45 MPa

*ν* = coefficiente di Poisson del terreno = 0,3

*R<sub>eq</sub>* = raggio equivalente della galleria = 6 m

Quindi, considerando un valore di *E*=45 MPa più che ragionevole per il tipo di terreno in esame (ferma restando la dipendenza di *E* dallo stato tensionale iniziale, dal percorso di carico e dal

livello di deformazione). In direzione normale si è assunto un limite di trazione pari a zero; si è controllato inoltre che i valori di tensione normale di compressione fossero inferiori alla spinta passiva del terreno.

Il coefficiente di sottofondo in direzione tangente alla struttura  $K_t$  è stato posto pari a 0,1  $K_n$ ; si è controllato che lo sforzo di taglio trasmesso al rivestimento fosse inferiore al valore limite calcolato in base alla seguente espressione.

$$\tau \leq \tau_{lim} = \sigma_n \operatorname{tg} \delta$$

dove:

$\sigma_n$  = sforzo normale;

$\delta$  = angolo di attrito terreno-struttura assunto coincidente con il valore medio  $\varphi = 18^\circ$  ottenuto dalle prove di taglio diretto in condizioni drenate su provini estratti da campioni prelevati dalla formazione argillosa di base.

#### 6.4.-..RESISTENZE DI PROGETTO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

##### RIVESTIMENTO DEFINITIVO ESISTENTE IN CALCARENITE

Si riportano, per la tipologia muraria in esame, i valori medi delle caratteristiche fisiche e dei parametri di resistenza e deformabilità così come indicati nella Tabella C.8.5.I della *Circolare*; i valori sono *aggiornati*, limitatamente ai valori di resistenza a compressione  $f$  e del modulo di deformabilità  $E$ , in virtù dei risultati delle prove in sito.

- $f = 2,81 \text{ MPa}$  resistenza media a compressione (valore aggiornato con risultati prove);
- $\tau_0 = 0,06 \text{ MPa}$  resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (Tab.C.8.5.I);
- $f_{v0} = 0,145 \text{ MPa}$  resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (Tab.C.8.5.I);
- $E = 1552,91 \text{ MPa}$  valore medio modulo di elasticità normale (aggiornato con risultati prove);
- $G = 450 \text{ MPa}$  valore medio del modulo di elasticità tangenziale (Tab.C.8.5.I);
- $w = 14,50 \text{ kN/m}^3$  peso specifico medio (Tab.C.8.5.I).

Le resistenze di progetto da impiegare, rispettivamente, per le verifiche a pressoflessione ( $f_d$ ), e a taglio ( $f_{vd}$ ) sono ottenute a partire dai valori caratteristici:

$$f_d = f_k / \gamma_M$$

$$f_{vd} = f_{vk} / \gamma_M$$

con:

- ✓  $f_k$ : resistenza caratteristica a compressione della muratura;

- ✓  $f_{vk}$ : resistenza caratteristica a taglio della muratura in presenza delle effettive tensioni di compressione, valutata secondo quanto indicato al §11.10.3.3 con la seguente espressione

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_n$$

dove:

- ✓  $f_{vk0}$ : è la resistenza caratteristica a taglio in assenza di carichi verticali;  
✓  $\sigma_n$ : è la tensione normale media dovuta ai carichi verticali agenti nella sezione di verifica.

Il valore massimo della resistenza caratteristica a taglio si pone pari a:

$$f_{vk,lim} = 0,065 f_b$$

in cui  $f_b = 25$  MPa è il valore medio di resistenza a compressione verticale dei blocchi di calcarenite (tufo calcareo – v. immagine seguente)

Materiale	Densità (Kg/m <sup>3</sup> )	Carico rottura a compressione (MPa)	Modulo di Elasticità E (MPa)
Graniti	2500-2900	100-200	50000-60000
Porfidi	2400-2700	100-250	50000-70000
Basalto	2700-3100	200-400	90000-120000
Tufo vulcanico	1100-1800	3-7	3000-15000
Tufo calcareo	1100-2000	1-50	-
Calcari teneri	2000-2400	10-40	20000-40000
Calcari compatti	2400-2700	50-150	20000-80000
Dolomie	2300-2900	100-110	40000-70000
Travertini	2200-2500	40-50	-
Conglomerati Breccie, Puddinghe	2000-2700	80-150	-
Arenarie	1800-2700	40-130	5000-30000
Marmi	2700-2800	100-140	40000-70000

Figura 9 – Resistenza a compressione delle pietre naturali

Nelle espressioni precedenti i valori caratteristici dei parametri di resistenza si ottengono dividendo le resistenze medie per il Fattore di Confidenza ( $FC$ ) relativo al livello di conoscenza raggiunto ( $LC$ ): nel caso in esame si divide per  $FC=1$  il valore medio di resistenza a compressione ( $LC3$ ) e per  $FC=1,2$  il valore medio di resistenza a taglio ( $LC2$ ).

Ai sensi del §C8.7.1 della circolare "...le verifiche nei riguardi di tutte le azioni...sono eseguite utilizzando i coefficienti  $\gamma_M$  definiti in Tab. 4.5. Il in § 4.5.6.1.". Nel caso in esame  $\gamma_M=3$ .

Nelle seguente tabella si riportano i valori delle resistenze di progetto [**MPa**] così calcolati.

	<b>Valore medio</b>	<b>Valore caratt.ico</b>	<b>Valore progetto[MPa]</b>
<b>Resistenza compr. e f</b>	2.81	2.81	0.94
<b>Resistenza taglio <math>f_v</math> (compressione nulla)</b>	0.145	0.121	0.040

#### BLINDAGGIO INTERNO DI NUOVA REALIZZAZIONE E TRAVE DI FONDAZIONE

Questi elementi strutturali saranno realizzati in conglomerato cementizio armato utilizzando un calcestruzzo appartenente alla Classe C25/30 ed acciaio in barre per cemento armato del tipo B450C. Nel seguito sono riportate le resistenze di progetto dei materiali.

#### **Calcestruzzo**

- Resistenza a compressione  $R_{ck}$  = 30,00 MPa;
- resistenza cilindrica di calcolo  $f_{cd}$  = 14,11 MPa;
- resistenza caratteristica a trazione (frattile 5%)  $f_{ctk}$  = 1,80 MPa;
- resistenza media trazione per flessione  $f_{cfm}$  = 2,56 MPa;

#### **Acciaio in barre per cemento armato – B450 C**

- resistenza di snervamento valore caratteristico  $f_{yk}$  = 450 MPa.
- resistenza di snervamento valore di calcolo  $f_{yd}$  = 391,3 MPa.

#### **Micropali di fondazione**

I micropali saranno realizzati con il metodo delle iniezioni ripetute e selettive (IRS). Si adopereranno i seguenti materiali:

- ✓ *Miscela di cemento generalmente costituita da 100 kg di cemento, 50 litri di acqua e 2,5 kg di bentonite con aggiunta di fluidificanti.*
- ✓ *Profilati in Acciaio S275 (Fe430) con sezione circolare*
- tensione di snervamento valore caratteristico  $f_{yk}$  = 275 MPa
- tensione di snervamento valore di progetto  $f_{yd}$  = 261,9 MPa
- tensione di rottura valore caratteristico  $f_{uk}$  = 430 MPa

### 6.5.-..ANALISI DELLO STATO DI FATTO

#### 6.5.1.-..Modelli e metodi di analisi

Le analisi sono state svolte mediante il codice di calcolo IperSpace BIM 2.1.0, prodotto e distribuito dalla Soft.Lab s.r.l. con sede in via Borgo II - 82030 - PONTE (BN).

Le verifiche SLU, di tipo strutturale, elencate in precedenza, sono state svolte a partire dai risultati di una analisi di interazione terreno-struttura.

Il modello è fondamentalmente definito dalla posizione dei nodi, collegati da elementi di tipo *shell* a comportamento sia flessionale che membranale, l'elemento finito *shell* utilizzato è anche in grado

di esprimere una rigidità rotazionale in direzione ortogonale al piano dello shell. Gli elementi shell utilizzati hanno forma rettangolare con dimensioni medie prossime a 0,625 m.

### **Modellazione degli elementi strutturali**

Gli elementi strutturali costituenti il rivestimento definitivo in calcarenite della galleria esistente (*calotta, reni, piedritti e arco rovescio*) sono stati discretizzati e modellati con elementi *shell* a comportamento elastico lineare. Nella seguente tabella sono riportati lo spessore *s*, il peso *w* ed il modulo di deformabilità *E* adottati nelle analisi per questo tipo di elementi.

<i>Elemento</i>	<i>spessore s [m]</i>	<i>w [kN/m<sup>3</sup>]</i>	<i>E [MPa]</i>
<b>Chiave calotta</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Reni</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Piedritti</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Arco rovescio</b>	0,40	14,50	1552,91

### **Modellazione del sottosuolo**

Nell'analisi sono state considerate le reazioni del terreno agenti sia in direzione normale che tangente all'asse degli elementi strutturali del rivestimento definitivo della galleria.

In virtù delle considerazioni espresse in precedenza si è assunto un valore del coefficiente di sottofondo in direzione normale alla struttura  $K_n = 1 \text{ kg/cm}^3$

In direzione normale si è assunto un limite di trazione pari a zero; si è controllato inoltre che i valori di tensione normale di compressione fossero inferiori alla spinta passiva del terreno.

Il coefficiente di sottofondo in direzione tangente alla struttura  $K_t$  è stato posto pari a 0,1  $K_n = 0,1 \text{ kg/cm}^3$ ; si è controllato che lo sforzo di taglio trasmesso al rivestimento fosse inferiore al valore limite calcolato in base alla seguente espressione.

$$\tau \leq \tau_{\text{lim}} = \sigma_n \text{tg} \delta$$

dove:

$\sigma_n$  = sforzo normale;

$\delta$  = angolo di attrito terreno-struttura assunto coincidente con il valore medio  $\varphi = 18^\circ$  ottenuto dalle prove di taglio diretto in condizioni drenate su provini estratti da campioni prelevati dalla formazione argillosa di base.

### **Condizioni di carico esaminate**

La zona di intervento, compresa tra la pk 52+162,45 (sbocco lato Trapani) e la pk 51+950 è stata suddivisa in n.2 *tratte parziali*; per ciascuna *tratta parziale* è stata quindi scelta, come sezione di calcolo dello stato tensionale, la sezione caratterizzata dalla massima potenza delle coperture. Sono state così individuate le sezioni di calcolo riportate nella seguente tabella.

Tratta parziale		Sezione	Copertura H	pv	ph
pk iniziale	pk finale	pk	[m]	[kPa]	[kPa]
52+162,45	52+006	52+006	6	117,60	81,26
52+006	51+950	51+950	14	204,10	141,03

Tutte le analisi sono state svolte in condizioni drenate, con riferimento quindi allo stato tensionale efficace ed ai parametri di resistenza a taglio dello scheletro solido.

#### 6.5.2.-. Risultati delle analisi e Verifiche di sicurezza

I risultati delle analisi sono riportati in forma grafica in allegato alla presente relazione in termini di tensioni normali massime da pressoflessione nelle sezioni del rivestimento, e momenti flettenti.

Ai fini delle verifiche, i valori massimi di progetto delle tensioni normali  $\sigma_{Ed}$  e dello sforzo di taglio  $\tau_{Ed}$  agenti nelle sezioni del rivestimento definitivo della galleria sono stati ottenuti amplificando le sollecitazioni calcolate per il coefficiente  $\gamma_{G2} = 1,3$  del gruppo A1.

I valori delle resistenze di progetto a pressoflessione  $f_d$  e taglio  $f_{vd}$  sono stati ottenuti dai valori caratteristici dividendo per il coefficiente  $\gamma_M = 3$  definito in Tab. 4.5.11 in § 4.5.6.1.”

Nelle seguenti tabelle si riportano i risultati delle verifiche a pressoflessione e taglio del rivestimento della galleria; le verifiche si intendono soddisfatte per valori del rapporto  $f_d/\sigma_{Ed} > 1$  e per valori del rapporto  $f_{vd}/\tau_{Ed} > 1$  (coefficienti  $\gamma_r$  del gruppo R1 pari all'unità).

#### Tratta da pk 52+162,45 (sbocco lato Trapani) a pk 52+006

Nella tratta in esame le coperture sono generalmente non maggiori di 6 m circa. Nella seguente tabella sono riportati i valori massimi di progetto della tensione normale ( $\sigma_{Ed}$ ) e dello sforzo di taglio ( $\tau_{Ed}$ ) calcolati nelle sezioni del rivestimento definitivo della galleria.

**Si può osservare che valori del rapporto  $f_d/\sigma_{Ed}$  e del rapporto  $f_{vd}/\tau_{Ed}$  sono maggiori dell'unità nelle sezioni di calotta mentre in arco rovescio non è soddisfatta la verifica a compressione.**

Elemento	Pressoflessione		Taglio	
	$\sigma_{Ed}$ [Mpa]	$f_d/\sigma_{Ed}$ [-]	$\tau_{Ed}$ [MPa]	$f_{vd}/\tau_{Ed}$ [-]
chiave calotta	0,648	<b>1,45</b>	0,071	<b>1,15</b>
Reni	0,733	<b>1,28</b>	0,080	<b>1,11</b>
Piedritto	0,900	<b>1,04</b>	0,075	<b>1,25</b>
Attacco piedritto-muretta	0,898	<b>1,04</b>	0,043	<b>2,33</b>
Arco rovescio	1,855	<b>0,50</b>	0,079	<b>1,03</b>

Le precedenti analisi sono state ripetute al fine di ricercare il valore della copertura per cui sono soddisfatte le verifiche a compressione in arco rovescio. Si è riscontrato che questo si verifica per coperture pari a 2 m. I risultati sono riportati nella seguente tabella.

Elemento	Pressoflessione		Taglio	
	$\sigma_{Ed}$	$f_d/\sigma_{Ed}$	$\tau_{Ed}$	$f_{vd}/\tau_{Ed}$

	[Mpa]	[-]	[MPa]	[-]
<b>Arco rovescio</b>	0,852	<b>1,10</b>	0,068	<b>1,12</b>

**Si può concludere che, nella tratta in esame:**

- per coperture inferiori ai 2 m, quindi dalla pk 52+162,45 (sbocco lato Trapani) fino alla pk 52+056 non sono necessari interventi di consolidamento.
- Per coperture comprese tra i 2 m ed i 6 m, quindi dalla pk 52+056 alla pk 52+006, sono necessari interventi di consolidamento in arco rovescio; si realizzerà per questo intervallo di pk un intervento di alleggerimento delle spinte in arco rovescio mediante esecuzione di micropali con diametro  $d=20\text{cm}$  lunghezza  $L=10\text{ m}$  ed interasse di 60 cm.

**Tratta da pk 52 + 006 a pk 51 + 950 (limite dell'intervento)**

Nella tratta in esame le coperture sono comprese tra i 6 m ed i 14 m circa. Nella seguente tabella sono riportati i valori massimi di progetto della tensione normale ( $\sigma_{Ed}$ ) e dello sforzo di taglio ( $\tau_{Ed}$ ) calcolati nelle sezioni del rivestimento definitivo della galleria.

**Si può osservare che i valori del rapporto  $f_d/\sigma_{Ed}$  e i valori del rapporto  $f_{vd}/\tau_{Ed}$  sono minori dell'unità; le verifiche non sono soddisfatte, ciò implica che per la tratta in esame saranno necessari interventi di consolidamento.**

Elemento	Pressoflessione		Taglio	
	$\sigma_{Ed}$	$f_d/\sigma_{Ed}$	$\tau_{Ed}$	$f_{vd}/\tau_{Ed}$
	[Mpa]	[-]	[MPa]	[-]
chiave calotta	1,109	<b>0,84</b>	0,123	<b>0,96</b>
Reni	1,217	<b>0,77</b>	0,129	<b>0,98</b>
Piedritto	1,486	<b>0,63</b>	0,122	<b>1,10</b>
Attacco piedritto-muretta	1,467	<b>0,64</b>	0,079	<b>1,80</b>
Arco rovescio	3,007	<b>0,31</b>	0,039	<b>0,80</b>

Nella seguente tabella le precedenti verifiche sono ripetute adottando un coefficiente moltiplicativo per la resistenza media a compressione pari a 1,2; quale potrebbe applicarsi, secondo le indicazioni della Tabella C.8.5.II della *circolare*, nel caso in cui, si procedesse ad un consolidamento con iniezioni di cemento.

Elemento	Pressoflessione		Taglio	
	$\sigma_{Ed}$	$f_d/\sigma_{Ed}$	$\tau_{Ed}$	$f_{vd}/\tau_{Ed}$
	[Mpa]	[-]	[MPa]	[-]
chiave calotta	1,109	<b>1,01</b>	0,123	<b>1,01</b>
Reni	1,217	<b>0,92</b>	0,129	<b>1,03</b>

Piedritto	1,486	<b>0,76</b>	0,122	<b>1,15</b>
Attacco piedritto-muretta	1,467	<b>0,77</b>	0,079	<b>1,88</b>
Arco rovescio	3,007	<b>0,37</b>	0,039	<b>1,01</b>

**Si osserva che le verifiche non sono soddisfatte. Per la tratta in esame si ricorre al dimensionamento del blindaggio interno della galleria il cui dimensionamento è riportato nei paragrafi seguenti.**

#### 6.5.3.-..Confronto sollecitazioni di progetto con le misure di stato tensionale in sito (martinetti piatti singoli)

Nella seguente tabella si riportano i risultati ottenuti nel corso delle prove di compressione con martinetti doppi:

Ubicazione	Tipologia muraria	Sigla	Tensione in situ [daN/cm <sup>2</sup> ]
km 52+022	Conci di calcarenite squadrati	MS1DX-DIR.TP	8.5
km 52+022	Conci di calcarenite squadrati	MS1SX-DIR.TP	9.7
km 52+118	Conci di calcarenite squadrati	MS2SX-DIR.TP	10.2
km 52+118	Conci di calcarenite squadrati	MS2DX-DIR.TP	10.1

Si può osservare che:

- alla pk 52+022, con coperture prossime ai 5,5 m il valore medio di tensione normale misurato, pari a 9,1 daN/cm<sup>2</sup>, è molto prossimo al valore di calcolo  $\sigma_{Ed} = 9 \text{ daN/cm}^2$  nella sezione alla pk 52+006 (H=6 m);
- alla pk 52+118, con coperture prossime al metro, il valore medio di tensione normale misurato, pari a 10.15 daN/cm<sup>2</sup>, è molto prossimo al valore di calcolo  $\sigma_{Ed} = 11,75 \text{ daN/cm}^2$  nella sezione alla pk 51+976 (H=10 m).

#### 6.6.-..ANALISI DI PROGETTO

##### 6.6.1.-..Modelli metodi di analisi

Le analisi sono state svolte mediante il codice di calcolo IperSpace BIM 2.1.0, prodotto e distribuito dalla Soft.Lab s.r.l. con sede in via Borgo II - 82030 - PONTE (BN).

Le verifiche SLU, di tipo strutturale, elencate in precedenza, sono state svolte a partire dai risultati di una analisi di interazione terreno-struttura.

Il modello è fondamentalmente definito dalla posizione dei nodi, collegati da elementi di tipo *shell* a comportamento sia flessionale che membranale, l'elemento finito *shell* utilizzato è anche in grado

di esprimere una rigidità rotazionale in direzione ortogonale al piano dello shell. Gli elementi shell utilizzati hanno forma rettangolare con dimensioni medie prossime a 0,625 m.

#### MODELLAZIONE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

Gli elementi strutturali costituenti il rivestimento definitivo in calcarenite della galleria esistente (*calotta, reni, piedritti e arco rovescio*) sono stati discretizzati e modellati con elementi *shell* a comportamento elastico lineare. Nella seguente tabella sono riportati lo spessore  $s$ , il peso  $w$  ed il modulo di deformabilità  $E$  adottati nelle analisi per questo tipo di elementi.

Elemento	spessore $s$ [m]	$w$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E$ [MPa]
<b>Calotta</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Reni</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Piedritti</b>	0,90	14,50	1552,91
<b>Arco rovescio</b>	0,45	14,50	1552,91

Il blindaggio interno è costituito da una soletta in conglomerato cementizio armato gettato in opera dello spessore di 20 cm. Anche il blindaggio, come il rivestimento in muratura della galleria esistente, è stato modellato con elementi *shell*. Nella seguente tabella sono riportati lo spessore  $s$ , il peso  $w$  ed il modulo di deformabilità  $E$  adottati nelle analisi per questo tipo di elementi.

Elemento	spessore $s$ [m]	$w$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E$ [MPa]
<b>Calotta</b>	0,20	25,00	31467
<b>Reni</b>	0,20	25,00	31467
<b>Piedritti</b>	0,20	25,00	31467

Il trasferimento dei carichi dal rivestimento della galleria esistente al blindaggio interno è reso possibile, nell'analisi, da elementi di collegamento del tipo *link rigido*; questi elementi collegano i nodi dei due rivestimenti, esterno e interno, agendo da vincoli interni in grado di trasferire azioni normali e tangenziali all'interfaccia tra i due.

La trave di collegamento dei micropali è stata modellata con elementi *beam* a comportamento elastico lineare. In tabella sono riportate le dimensioni geometriche della sezione (base  $b$  e altezza  $h$ ), il peso  $w$  ed il modulo di deformabilità  $E$  adottati nelle analisi per questo tipo di elementi.

Elemento	$b$ [m]	$h$ [m]	$w$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E$ [MPa]
<b>Trave collegamento</b>	0,45	0,50	25,00	31467

I micropali di fondazione del blindaggio interno di nuova realizzazione sono stati modellati con elementi *read-in matrix*, elementi specifici resi disponibili dal software utilizzato per la modellazione di pali di fondazione. In tabella sono riportate le dimensioni geometriche dei pali (diametro  $d$  e lunghezza  $L$ ), il peso  $w$  ed il modulo di deformabilità  $E_p$  adottati nelle analisi per gli elementi.

Elemento	$d$ [m]	$L$ [m]	$w$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_p$ [MPa]
<b>Micropali</b>	0,20	10,00	25,00	31467

### MODELLAZIONE DEL SOTTOSUOLO

Nell'analisi sono state considerate le reazioni del terreno agenti sia in direzione normale che tangente all'asse degli elementi strutturali del rivestimento definitivo della galleria.

In virtù delle considerazioni esposte in precedenza si è assunto un valore del coefficiente di sottofondo in direzione normale alla struttura  $K_n = 1 \text{ kg/cm}^3$ .

In direzione normale si è assunto un limite di trazione pari a zero; si è controllato inoltre che i valori di tensione normale di compressione fossero inferiori alla spinta passiva del terreno.

Il coefficiente di sottofondo in direzione tangente alla struttura  $K_t$  è stato posto pari a 0,1  $K_n = 0,1 \text{ kg/cm}^3$ ; si è controllato che lo sforzo di taglio trasmesso al rivestimento fosse inferiore al valore limite calcolato in base alla seguente espressione.

$$\tau \leq \tau_{lim} = \sigma_n \operatorname{tg} \delta$$

dove:

$\sigma_n$  : sforzo normale;

$\delta$  : angolo di attrito terreno-struttura assunto coincidente con il valore medio  $\varphi = 18^\circ$  ottenuto dalle prove di taglio diretto in condizioni drenate su provini estratti da campioni prelevati dalla formazione argillosa di base.

### CONDIZIONI DI CARICO ESAMINATE

La tratta interessata dalla realizzazione del blindaggio interno è compresa tra la pk 52+006 e la pk 51+950. Come sezione di calcolo dello stato tensionale è stata scelta la sezione caratterizzata dalla massima potenza delle coperture, alla pk 51+950, come riportato nella seguente tabella.

Tratta parziale		Sezione	Copertura H	pv	ph
pk iniziale	pk finale	pk	[m]	[kPa]	[kPa]
52+006	51+950	51+950	14	204,10	141,03

Le analisi sono state svolte in condizioni drenate, con riferimento quindi allo stato tensionale efficace ed ai parametri di resistenza a taglio dello scheletro solido.

#### 6.6.2.-..Verifica del rivestimento definitivo esistente in calcarenite

I risultati delle analisi sono riportati in forma grafica in allegato alla presente relazione in termini di tensioni normali massime da pressoflessione nelle sezioni del rivestimento, e momenti flettenti.

Ai fini delle verifiche, i valori massimi di progetto delle tensioni normali  $\sigma_{Ed}$  agenti nelle sezioni del rivestimento definitivo della galleria sono stati ottenuti amplificando le sollecitazioni calcolate per il coefficiente  $\gamma_{G2} = 1,3$  del gruppo A1.

Il valore della resistenza di progetto a pressoflessione  $f_d$  è stato ottenuto dividendo il corrispondente valore caratteristico per il coefficiente  $\gamma_M = 3$  definito in Tab. 4.5.delle NTC18.

Nelle seguenti tabelle si riportano i risultati delle verifiche svolte; esse si intendono soddisfatte per valori del rapporto  $f_d / \sigma_{Ed} > 1$  (coefficienti  $\gamma_r$  del gruppo R1 pari all'unità).

ELEMENTO	PRESSOFLESSIONE	
	$\sigma_{Ed}$ [Mpa]	$fd/\sigma_{Ed}$
Chiave calotta	0,092	<b>10,19</b>
Reni	0,272	<b>3,44</b>
Piedritto	0,339	<b>2,76</b>
Attacco piedritto-muretta	0,355	<b>2,63</b>
Arco rovescio	0,690	<b>1,36</b>

### Verifiche soddisfatte.

#### 6.6.3.-..Dimensionamento blindaggio interno

Nel presente paragrafo si riportano i risultati del dimensionamento del blindaggio interno della galleria con soletta in conglomerato cementizio armato. I risultati delle analisi sono riportati in allegato in termini di spostamenti, momenti flettenti e tensioni normali.

Ai fini delle verifiche, i risultati numerici delle analisi in termini di sforzo normale, momento flettente e taglio nelle sezioni della soletta sono stati moltiplicati per il coefficiente  $\gamma_{G2} = 1,3$  del gruppo A1.

La soletta avrà uno spessore di 20 cm e sarà realizzata con i seguenti materiali:

- **Calcestruzzo:** **Classe di Resistenza C25/30**
- **Acciaio:** **barre B450C:**
  - ✓ Armatura in intradosso: 5  $\phi$ 14 - copriferro di 3,5 cm;
  - ✓ Armatura in estradosso: 5  $\phi$ 14 - copriferro di 3,5 cm;
  - ✓ Rete elettrosaldata intradosso:  $\phi$ 8/20 cm

### Verifica a pressoflessione

Nella figura seguente sono riportate, nel piano N-M, le coppie  $(M-N)_{Ed}$  rappresentative dello stato di sollecitazione (pressoflessione) nelle sezioni della parete; è riportato inoltre il dominio di resistenza della sezione  $(M-N)_{Rd}$ .

**Le coppie  $(N-M)_{Ed}$  sono contenute nel dominio di resistenza, la verifica è soddisfatta.**

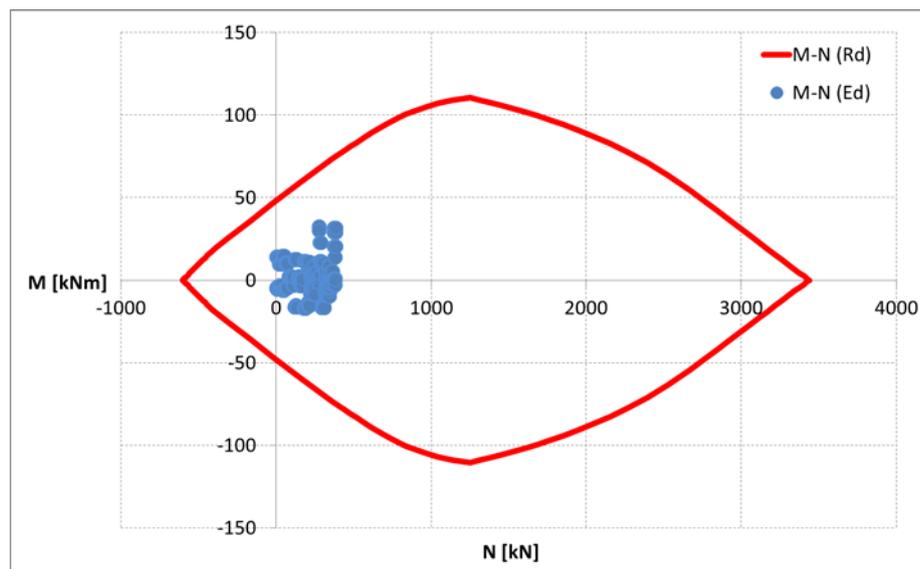


Figura 10 – Dominio di resistenza della sezione e azioni di progetto

### Verifica a taglio

Nelle sezioni di progetto si verifica che il taglio resistente  $V_{Rd}$  sia non inferiore al taglio sollecitante  $V_{Ed}$ .

Ai fini delle verifiche, i risultati numerici delle analisi, in termini di azione tagliante nelle sezioni della parete, sono stati moltiplicati per il coefficiente  $\gamma_{G2} = 1,3$  del gruppo A1.

Il taglio resistente  $V_{Rd}$  è stato calcolato con la seguente espressione (NTC18 - §4.1.2.3.5.1):

$$V_{Rd} = \max \{ [0,18 k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \sigma_{cp} ] b_w d ; (v_{\min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d \} [N]$$

dove:

- $f_{ck} = 25$  MPa
- $k = 1 + (200/d)^{1/2}$
- $v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$

essendo:

- $d$  altezza utile della sezione (in mm);
- $\rho = A_{sl} / (b_w d)$ : rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa ( $\rho \leq 0,02$ );
- $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$  in MPa, la tensione media di compressione nella sezione ( $\leq 0,2 f_{cd}$ );
- $b_w$  larghezza minima della sezione (in mm).

I risultati dei calcoli sono riportati nella seguente tabella da cui **Risulta  $V_{Ed} < V_{Rd}$** ,

**la verifica è soddisfatta.**

sezione	$b_w$	$d$	$A_s$	$k$	$\rho l$	$V_{Rd}$	$v_{min}$	$V_{Rd min}$	$V_{Ed}$
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kN]	[MPa]	[kN]	[kN]
chiave calotta	1000	200	769,7	2,00	0,0038	102,09	0,495	98,99	74,83
reni	1000	200	769,7	2,00	0,0038	102,09	0,495	98,99	93,70
piedritto	1000	200	769,7	2,00	0,0038	102,09	0,495	98,99	86,70
Attacco muretta-piedritto	1000	450	769,7	1,67	0,0017	146,08	0,377	169,44	164,01

#### 6.6.4.-..Verifica della trave di collegamento dei micropali

Per il blindaggio interno di nuova realizzazione, in corrispondenza dell'attacco piedritto-muretta, si calcola una tensione normale massima di compressione pari a circa 3,6 MPa ( $\sigma_{yy} = 35,98 \text{ kg/cm}^2$ ).

Moltiplicando il suddetto valore di calcolo per il coefficiente  $\gamma_{G1}=1,3$  (A1) si ottiene un valore della tensione di compressione di progetto pari a circa 4,666 MPa.

Il carico uniformemente distribuito  $q_{Ed}$  [kN/m], agente sulla trave di collegamento in c.a. di nuova realizzazione, sarà quindi pari a:

$$q_{Ed} = 4,666 \times 200 = 933,20 \text{ N/mm} = 933,20 \text{ kN/m}$$

Il momento flettente  $M_{Ed}$  ed il taglio massimo  $V_{Ed}$  sono calcolati modellando la trave di collegamento come una trave continua su appoggi disposti ad un interasse pari all'interasse fra i micropali  $i = 0,625 \text{ m}$  e sollecitata dal carico uniformemente distribuito  $q_{Ed}$ .

Il massimo valore negativo  $M_{Ed}^-$ , in corrispondenza degli appoggi, è calcolato con la seguente espressione:

$$M_{Ed}^- = \frac{q_{Ed} i^2}{10} = -36,45 \text{ kNm}$$

Il massimo valore positivo  $M_{Ed}^+$ , in mezzeria, per le campate centrali (incastrate agli estremi) è calcolato con la seguente espressione:

$$M_{Ed}^+ = \frac{q_{Ed} i^2}{24} = 15,19 \text{ kNm}$$

Il massimo valore positivo  $M_{Ed}^+$ , in mezzeria, per le campate di estremità (appoggiate agli estremi) è calcolato con la seguente espressione:

$$M_{Ed}^+ = \frac{q_{Ed} i^2}{8} = 45,57 \text{ kNm}$$

Il massimo valore del taglio  $V_{Ed}$ , in corrispondenza degli appoggi, è calcolato con la seguente espressione:

$$V_{Ed} = \frac{q_{Ed} i}{2} = 291,63 \text{ kN}$$

#### Verifica a flessione

La muretta di B x H = 45x50 cm sarà realizzata con i seguenti materiali:

- **Calcestruzzo appartenente alla Classe di Resistenza C25/30**
- **Acciaio in barre ad aderenza migliorata del tipo B450C:**
  - Armatura superiore: 4 barre  $\phi 14$  - copriferro di 3,5 cm;
  - Armatura di parete: 2 barre  $\phi 14$  - copriferro di 3,5 cm;
  - Armatura inferiore: 4 barre  $\phi 14$  - copriferro di 3,5 cm;
  - Armatura a taglio: staffe  $\phi 10/20$  cm.

La verifica della sezione fornisce i seguenti risultati per  $N_{Ed}=0$ :

- |   |                    |                             |
|---|--------------------|-----------------------------|
| • Momento ultimo sezione                            | $M_{Rd}$           | = 133,3 KNm;                |
| • massima tensione di compressione nel calcestruzzo | $\sigma_c$         | = 14,17 N/mm <sup>2</sup> ; |
| • massima tensione di trazione nell'acciaio         | $\sigma_s$         | = 391,3 N/mm <sup>2</sup> ; |
| • deformazione nel calcestruzzo compresso           | $\epsilon_{csup}$  | = 0,0035;                   |
| • deformazione nell'acciaio teso                    | $\epsilon_{s inf}$ | = -0,03062;                 |
| • altezza asse neutro                               | x                  | = 4,771 cm.                 |

Nella figura seguente sono riportati i valori di  $M_{Ed}$ , positivi e negativi, calcolati in precedenza per le sezioni sugli appoggi e in mezzeria. I punti rappresentativi dello stato di sollecitazione ricadono all'interno del dominio di resistenza M-N della sezione: **le verifiche sono soddisfatte.**

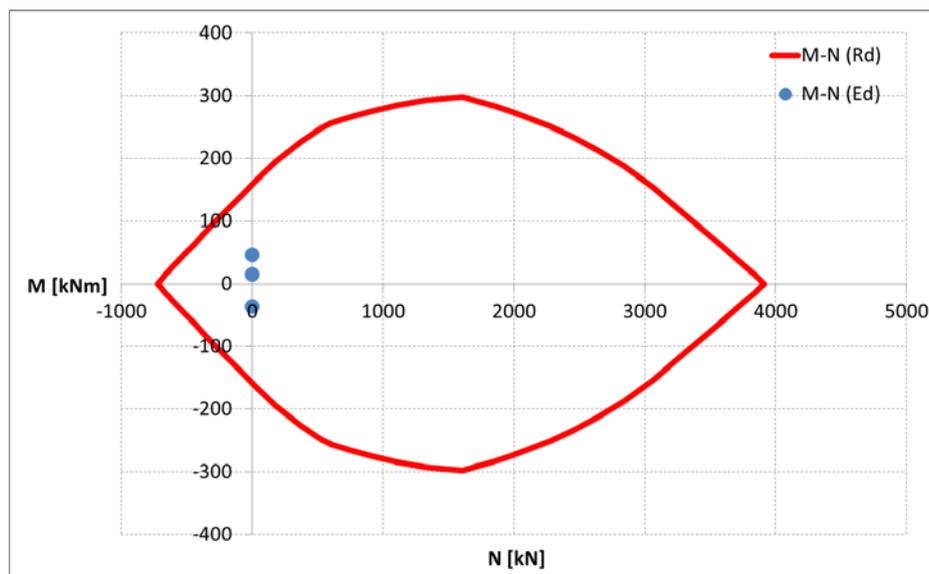


Figura 11 – Dominio di resistenza della sezione e azioni di progetto

### Verifica a taglio

Nelle sezioni di progetto si verifica che il taglio resistente  $V_{Rd}$  sia non inferiore al taglio sollecitante  $V_{Ed} = 291.63$  kN calcolato per la combinazione delle azioni SLU.

La verifica a taglio è stata eseguita con le seguenti espressioni (NTC 2018 - §4.1.2.3.5.2):

$$V_{Rcd} = 0.9 d b \alpha_c f'_{cd} (ctg\vartheta + ctga) / (1 + ctg^2\vartheta)$$

e

$$V_{Rsd} = 0,9 d A_{sw}/s f_{yd} (ctg\vartheta + ctga) \text{ sen}\alpha$$

in cui:

$V_{Rcd}$  = resistenza di progetto a “taglio compressione”;

$V_{Rsd}$  = resistenza di progetto a “taglio trazione”;

$b$  = base della sezione rettangolare;

$d$  = altezza utile della sezione rettangolare;

$A_{sw}$  = area dell’armatura trasversale;

$s$  = passo delle staffe;

$f_{yd}$  = resistenza di calcolo dell’acciaio pari a  $f_{yk}/\gamma_s = 391.3 \text{ N/mm}^2$  (resistenza caratteristica / coefficiente riduttivo per l’acciaio);

$\theta$  = inclinazione puntoni compressi, che deve rispettare il limite imposto dal par. 4.1.17 di  $1 \leq ctg\theta \leq 2.5$ ;

$\alpha$  = angolo di inclinazione dell’armatura trasversale, pari nel caso in esame a  $90^\circ$ ;

$f_{cd}$  = valore di progetto della resistenza a compressione del cls pari a  $f_{cd} = 14.17 \text{ MPa}$ ;

$f'_{cd} = 0,5 * f_{cd} = 7.085 \text{ MPa}$ ;

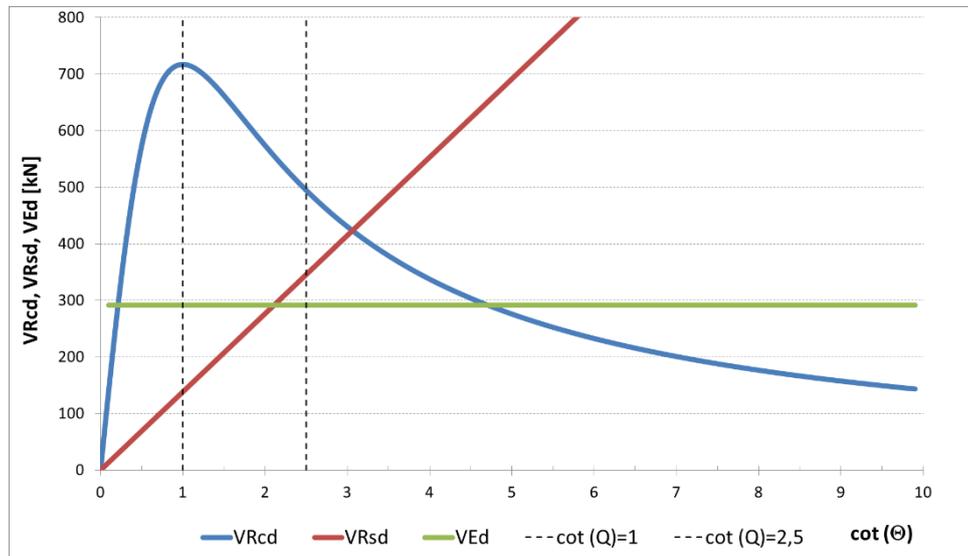
$\alpha_c$  = coefficiente maggiorativo pari a 1 per membrane non compresse

$1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$	per $0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 * f_{cd}$
1,25	per $0.25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,50 f_{cd}$
$2.5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$	per $0.50 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 1,00 * f_{cd}$

con  $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$  compressione media nella sezione di calcestruzzo.

Nel caso in esame  $N_{Ed} = 0$  quindi  $\sigma_c = 1.00$ .

Dalla figura seguente è possibile osservare che, per la sezione adottata, l’intersezione tra le curve rappresentative di  $V_{Rcd} (cot \vartheta)$  e  $V_{Ed}$  avviene per valori di  $ctg \theta > 2,5$ ; l’armatura a taglio è stata pertanto dimensionata per  $ctg \theta = 2,50$ .



**Figura 12 – Dimensionamento dell’armatura a taglio**

Nel seguito si riporta il calcolo dei valori di  $V_{Rcd}$  e  $V_{Rsd}$ :

$$V_{Rcd} = 0.9 * 500 * 400 * 1 * 7,085 * (2.5 + 0) / (1 + 2.5^2) = 494587 \text{ N} = 494,587 \text{ kN}$$

$$V_{Rsd} = 0,9 * 500 * 157,08 / 200 * 391,3 * (2.5 + 0) * 1 = 345771 \text{ N} = 345.771 \text{ kN}$$

**Risulta  $V_{Ed} = 291.63 \text{ kN} < \min(V_{Rsd}, V_{Rcd}) = 345.771 \text{ kN}$ , la verifica è soddisfatta.**

#### 6.6.5.-..Dimensionamento dei micropali

Si prevede la realizzazione di micropali aventi diametro di perforazione  $d = 20 \text{ cm}$  e un interasse di  $0,625 \text{ m}$ . La lunghezza minima dei micropali è ottenuta imponendo il soddisfacimento della verifica a carico limite dei pali nei riguardi dei carichi assiali (N.T.C.18 - §6.4.3.1.1):

$$N_{Ed} < R_d$$

in cui:

$N_{Ed}$  = azione assiale massima di progetto ottenuta moltiplicando il carico uniformemente distribuito  $q_{Ed} [kN/m]$ , agente sulla muretta in c.a., per l'interasse tra i pali  $i=0,625 \text{ m}$

$$N_{Ed} = q_{Ed} \times l = 933,20 \times 0,625 = 583,25 \text{ kN}$$

$R_d$  = valore di progetto della resistenza, ottenuto a partire dal valore caratteristico  $R_k$  applicando i coefficienti parziali  $\gamma_R$  della Tab. 6.4.II delle NTC18.

**Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche**

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	$\gamma_R$	(R3)	(R3)	(R3)
Base	$\gamma_b$	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,15	1,15	1,15
Totale (*)	$\gamma$	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,25	1,25	1,25

Nel caso in esame (pali trivellati) si adottano i seguenti valori dei coefficienti parziali (R3):

$\gamma_b = 1.35$  per la resistenza alla base;

$\gamma_s = 1.15$  per la resistenza laterale in compressione.

Il valore di progetto della resistenza  $R_d$  è calcolato, con il metodo di Bustamante e Doix (1985), come somma dei valori di progetto della resistenza laterale  $S_d$  e della resistenza alla punta  $P_d$  con la seguente espressione:

$$R_d = P_d + S_d = \frac{0,15 S_{calc}}{\xi_3 \gamma_b} + \frac{S_{calc}}{\xi_3 \gamma_s}$$

in cui si è posta la resistenza alla punta pari al 15% della resistenza laterale in compressione mentre  $\xi_3$  è un fattore di correlazione da applicarsi al valore medio di calcolo, riportato nella Tab.6.4.IV delle NTC18, in funzione del numero  $n$  di verticali di indagine; nel caso in esame  $\xi_3$  è pari ad 1,5 considerando un numero di verticali di indagine pari a 5 (campagne di indagini geognostiche degli anni 1993 e 2020).

**Tab. 6.4.IV - Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in f**

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
$\xi_4$	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

Il valore di calcolo  $S_{calc}$  della resistenza laterale in compressione è dato dalla seguente espressione:

$$S_{calc} = \pi \alpha d L s$$

in cui:

- ✓  $d$  è il diametro di perforazione;
- ✓  $L$  è la lunghezza del tratto iniettato;

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO S.O. INGEGNERIA DI PALERMO	ELETTRIFICAZIONE LINEA: PALERMO – TRAPANI (VIA MILO) TRATTA: CINISI(I) – ALCAMO DIRAMAZIONE (I)	 <b>ITALIANA SISTEMI</b> s.r.l.		
CODIFICA ELABORATO <b>304817S01PDTSG48001E015A</b>	TITOLO DOCUMENTO GALLERIA SPADAFORA – RELAZIONE DI CALCOLO RIVESTIMENTO	<b>ATI</b> SINTAGMA ITALIANA SISTEMI <table border="1" data-bbox="1449 181 1535 257"> <tr> <td>PAGINA</td> </tr> <tr> <td>48 / 66</td> </tr> </table>	PAGINA	48 / 66
PAGINA				
48 / 66				

- ✓  $\alpha$  è un coefficiente maggiorativo funzione della tecnologia esecutiva e del tipo di terreno; nel caso in esame (terreno argilloso) esso è pari a:
  - 1,8÷ 2 per micropali eseguiti con iniezioni ripetute e controllate con tubo a valvole e doppio otturatore (*IRS, injection répétitive et sélective*);
  - 1,2 per micropali eseguiti con getto dell'intero palo in un'unica soluzione (*IGU, injection globale unique*).
- ✓  $s$  è la resistenza tangenziale all'interfaccia fra tratto iniettato e terreno.

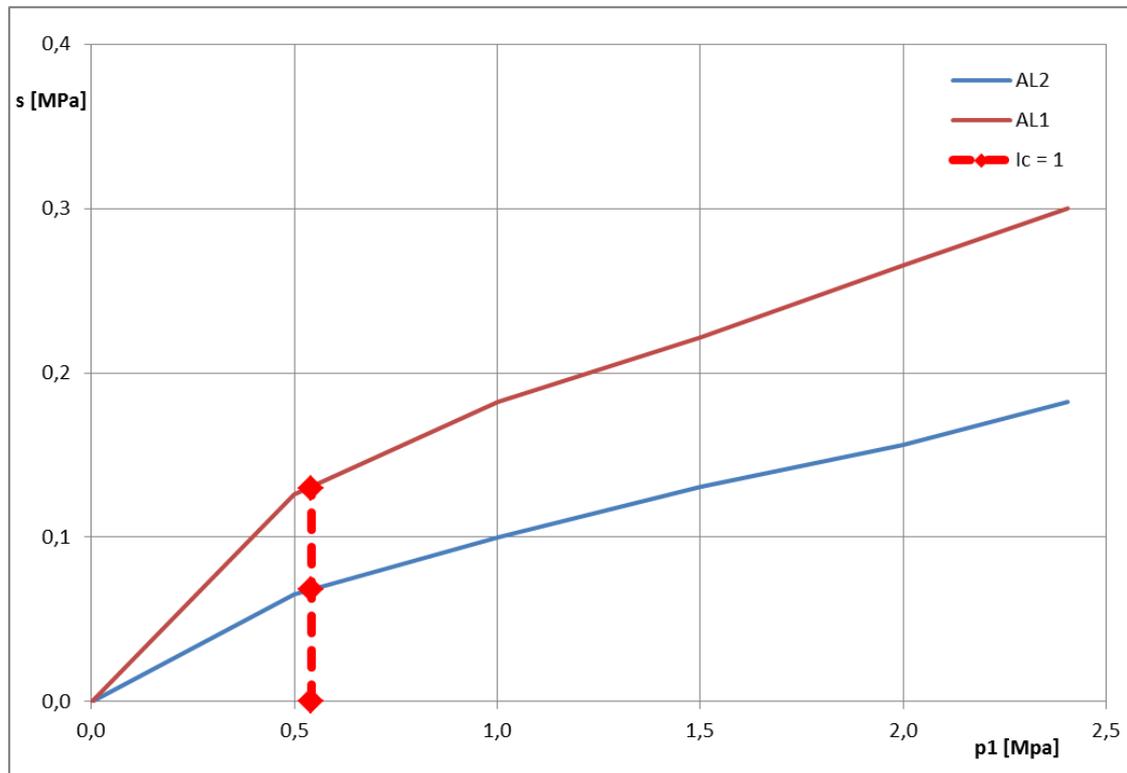
Bustamante e Doix (1985) forniscono degli abachi per la stima dei valori della resistenza tangenziale  $s$  in funzione della pressione limite  $p_l$  determinata con il pressimetro Ménard; tuttavia possono utilizzarsi anche le informazioni sulla consistenza delle argille.

I valori di  $s$  sono forniti in abachi distinti in funzione sia della natura sia della tecnologia esecutiva prescelta per la realizzazione dei micropali. Nel seguente grafico sono riportati i valori di  $s$  per terreni classificati come "Limo e argilla" per micropali del gruppo *IRS* (*AL1* nel grafico) e del gruppo *IGU* (*AL2* nel grafico).

Nel caso in esame, le prove di laboratorio forniscono dei valori dell'indice di consistenza prossimo all'unità; questo valore può riguardarsi come valore limite di separazione tra argille "moderatamente consistenti" e argille "consistenti".

Nell'abaco fornito dagli Autori il valore limite di separazione tra argille "moderatamente consistenti" e argille "consistenti" è posto in corrispondenza di un valore di  $p_l$  pari a circa 0,54 MPa; in corrispondenza di tale valore di ottengono i seguenti valori di  $s$ :

- ✓  $s = 0,130$  MPa per micropali di tipo *IRS*;
- ✓  $s = 0,068$  MPa per micropali di tipo *IGU*.



**Figura 1. Abaco di Bustamante-Doix (1985): Limi e argille**

### Dimensionamento di micropali tipo IRS

Nelle seguenti tabelle si riportano i calcoli di dimensionamento della lunghezza dei micropali di tipo IRS. Gli Autori suggeriscono di considerare i micropali come se fossero di tipo IGU nei primi 5 m e di prolungare i pali stessi di almeno 4 m dopo i primi 5.

Nelle tabelle seguenti sono pertanto considerati: un primo tratto, della lunghezza di 5 m, considerato come micropalo di tipo IGU; un secondo tratto, della lunghezza di 5m, considerato come micropalo di tipo IRS. La lunghezza complessiva dei micropali necessaria per il soddisfacimento delle verifiche è pertanto pari a 10 m.

Nella seguente tabella si riporta il calcolo della resistenza laterale per i due tratti di 5 m di cui si compone il micropalo.

Tratto	$\alpha$	$d$	$L$	$s$	$S_{calc}$
[n.]	[-]	[m]	[m]	[KN/m <sup>2</sup> ]	[kN]
1 (IGU)	1,20	0,24	5	68	256
2 (IRS)	1,90	0,38	5	130	776

A partire dal valore della resistenza laterale di calcolo  $S_{calc}$ , si calcola quindi la resistenza di progetto  $R_d$  del micropalo (si veda la tabella seguente).

<b>Scalc</b>	<b>Sd</b>	<b>0,15 Scalc</b>	<b>Pd</b>	<b>Rd</b>
<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>
1032,33	598,5	154,85	76,47	674,92

Nella seguente tabella è riportato il peso proprio dei due tratti di palo (valori amplificati mediante il coefficiente  $\gamma_{G1}=1,3$  del gruppo A1).

<b>Tratto</b>	<b>Peso</b>
<b>[n.]</b>	<b>[kN]</b>
1 (IGU)	7,4
2 (IRS)	18,4

Sommando il peso proprio del palo al valore di  $N_{Ed} = 583,25$  kN si ottiene il valore dell'azione di progetto  $Ed$  da considerare nella verifica.

<b><math>N_{Ed}</math></b>	<b><math>Ed</math></b>	<b><math>Rd</math></b>	<b><math>Rd/Ed</math></b>
<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>	<b>[kN]</b>	<b>[-]</b>
583,25	609,0	674,92	1,11

**La verifica è soddisfatta. I micropali, di tipo IRS, avranno, dunque, un diametro  $D = 20$  cm e  $L_{min} = 10$  m e, realizzati con interasse  $i = 60$  cm, saranno armati con un tubo in acciaio S275 (Fe430) di forte spessore con le seguenti caratteristiche geometriche:**

<b><math>D_{est}</math></b>	<b><math>D_{int}</math></b>	<b><math>s</math></b>	<b><math>W_{el}</math></b>	<b><math>A</math></b>	<b><math>A_v = 2A/\pi</math></b>
<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm<sup>3</sup>]</b>	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[mm<sup>2</sup>]</b>
101,6	76,6	12,5	69695,37	3498,95	2227,5

- $D_{est}$  è il diametro esterno del tubo;
- $D_{int}$  è il diametro interno del tubo;
- $s$  è lo spessore del tubo;
- $W_{el}$  è il modulo di resistenza elastico della sezione;
- $A$  è l'area della sezione;
- $A_v = 2A/\pi$  è l'area resistente a taglio della sezione.

La verifica è effettuata in campo elastico, tramite il calcolo della tensione ideale  $\sigma_{id}$ , data dalla seguente espressione (§4.2.4.1.2 – NTC18):

$$\sigma_{id} = (\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2)^{0,5} = \sqrt{\left(\frac{M_{Ed}}{W_{el}}\right)^2 + 3\left(\frac{T_{Ed}}{A_v}\right)^2} \leq f_{yd}$$

L'esito della verifica è riportato nella seguente tabella.

$N_{Ed}$	$M_{Ed}$	$V_{Ed}$	$\sigma_{id}$	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_M$
[N]	[Nmm]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
583247	5932550	10374	251,9	261,9

- $N_{Ed}$  è lo sforzo normale di progetto;
- $M_{Ed}$  è il momento flettente di progetto;
- $V_{Ed}$  è il taglio di progetto;
- $\sigma_{id}$  è la tensione ideale;
- $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{MO}$  è il valore di progetto della tensione di snervamento dell'acciaio;
- $f_{yk} = 275$  MPa è il valore caratteristico della tensione di snervamento dell'acciaio S275 (Fe430);
- $\gamma_{MO} = 1,05$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza (Tab. 4.2.VII – NTC18).

**La verifica è soddisfatta .**

## 7.-.ALLEGATI

### 7.1.-.ANALISI DELLO STATO DI FATTO – RISULTATI

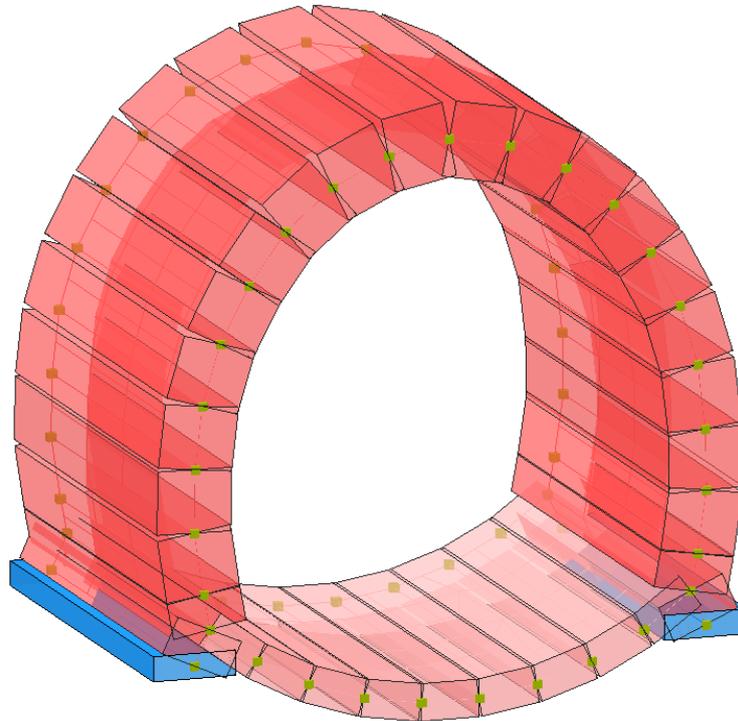


Fig.1\_Modello di calcolo: vista prospettica

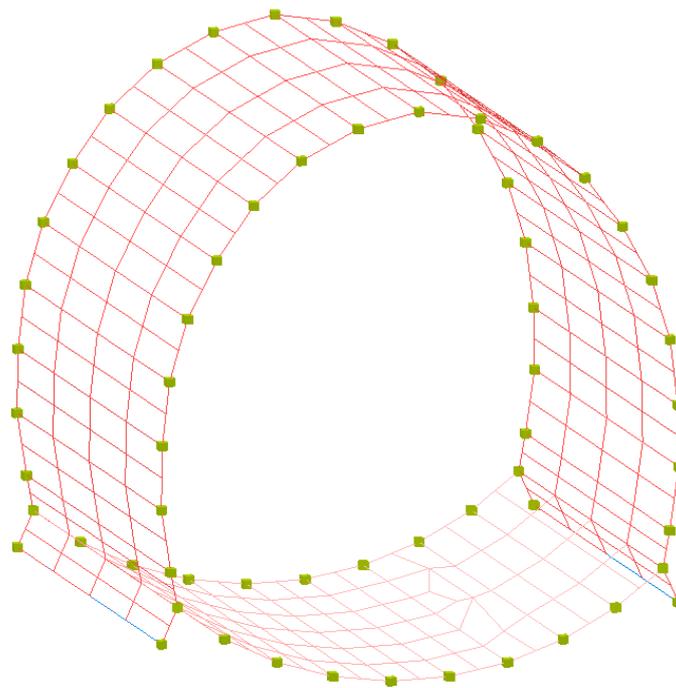


Fig.2\_Modello di calcolo: vista prospettica, elementi shell

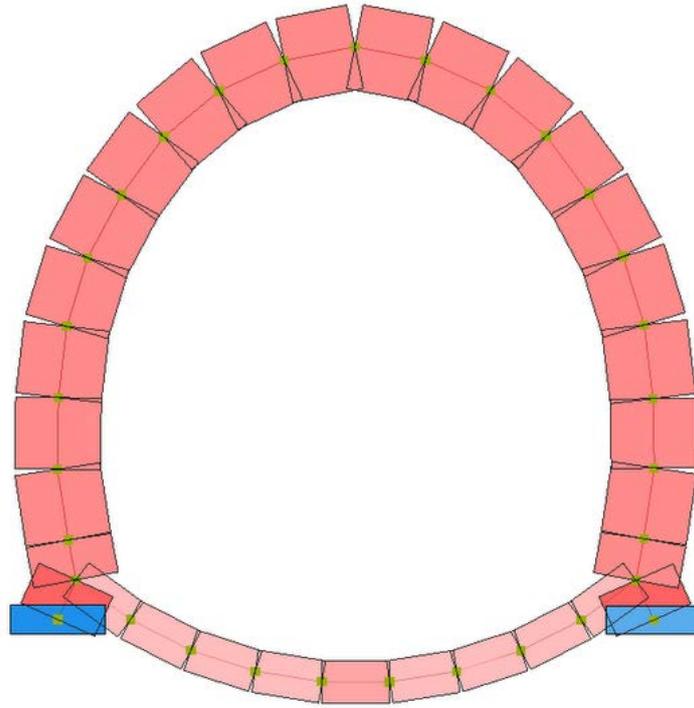


Fig.3\_Modello di calcolo: vista frontale

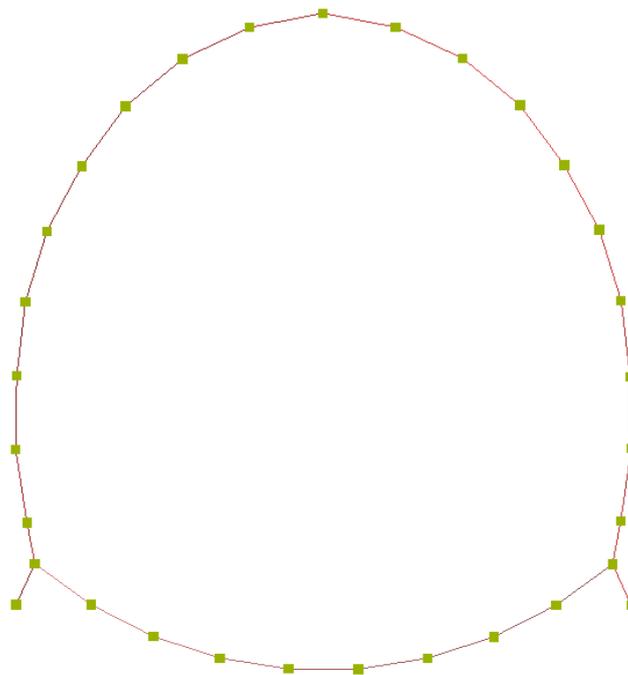


Fig.4\_Modello di calcolo: vista frontale, elementi shell

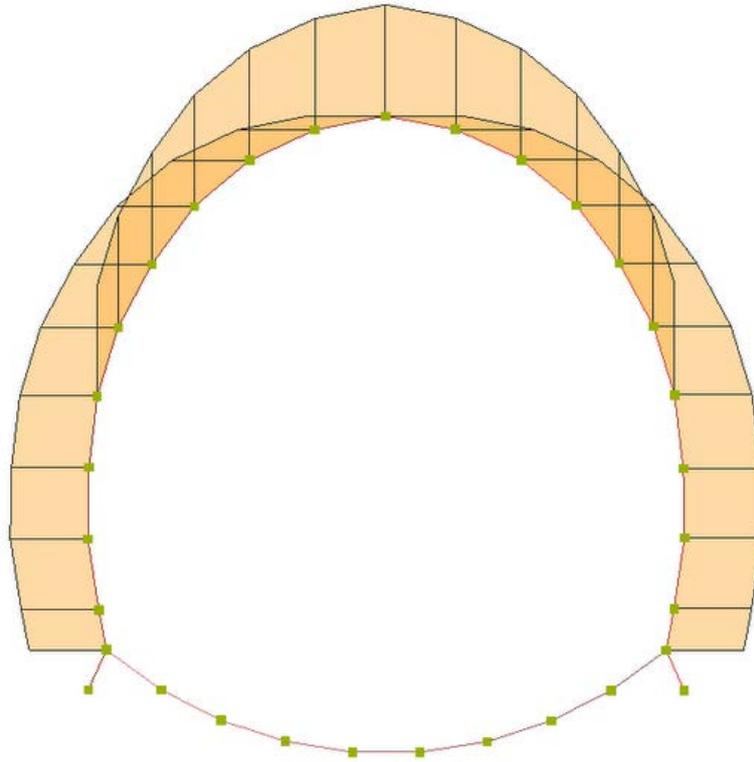


Fig.5\_Modello di calcolo: carichi applicati per H=6 m

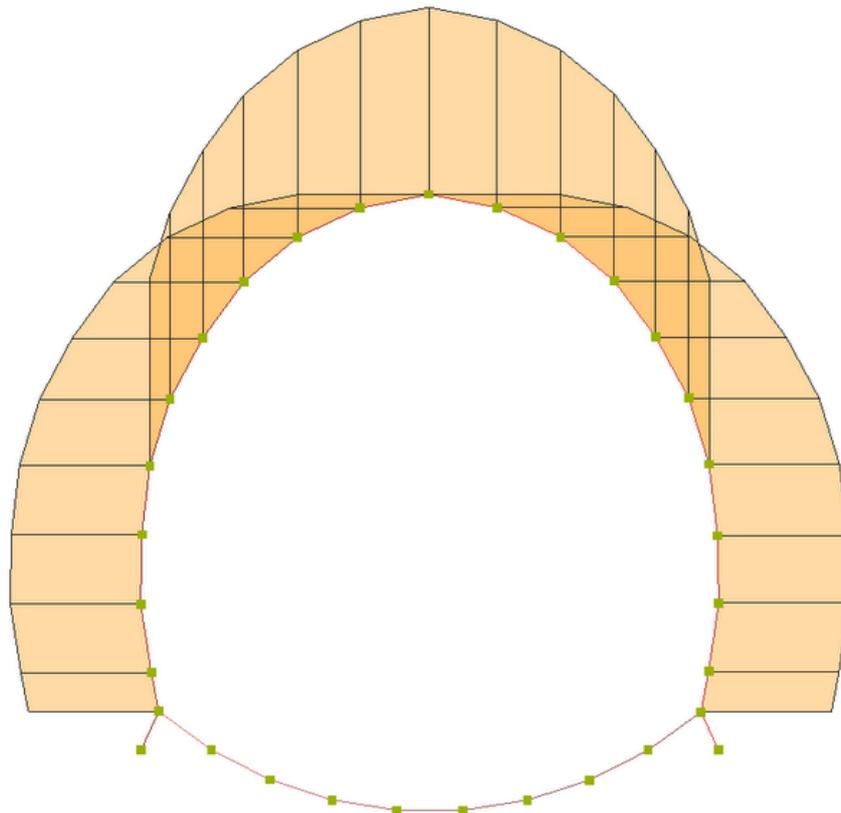


Fig.6\_Modello di calcolo: carichi applicati per H=14 m

Tipo diagramma: Deformata  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_ 2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1

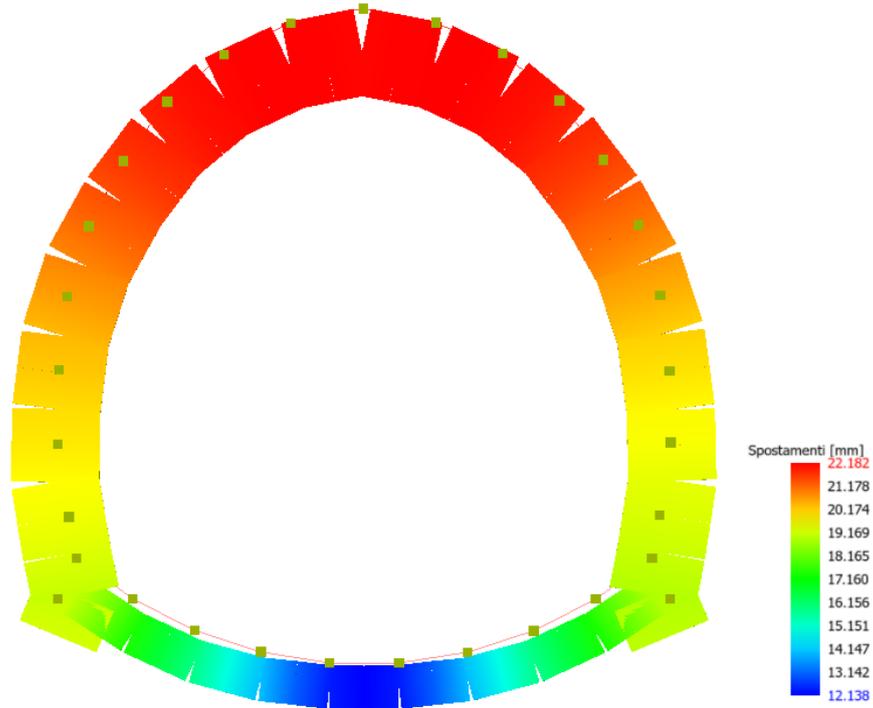


Fig.7\_Risultati: spostamenti per H=6 m

Tipo diagramma: Deformata  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_ 2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1

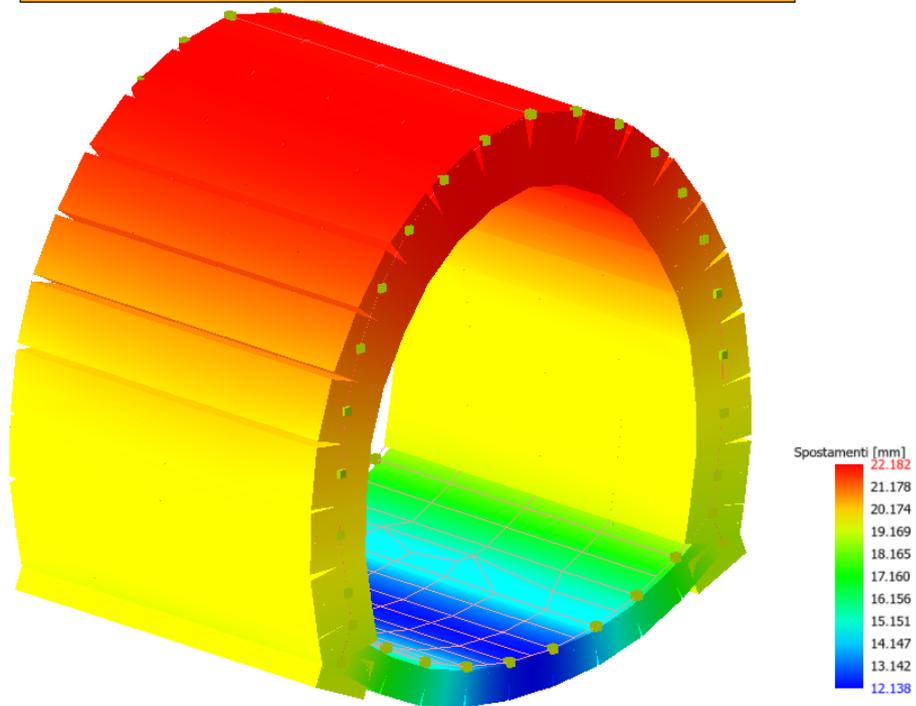


Fig.8\_Risultati: spostamenti per H=6 m

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Syy

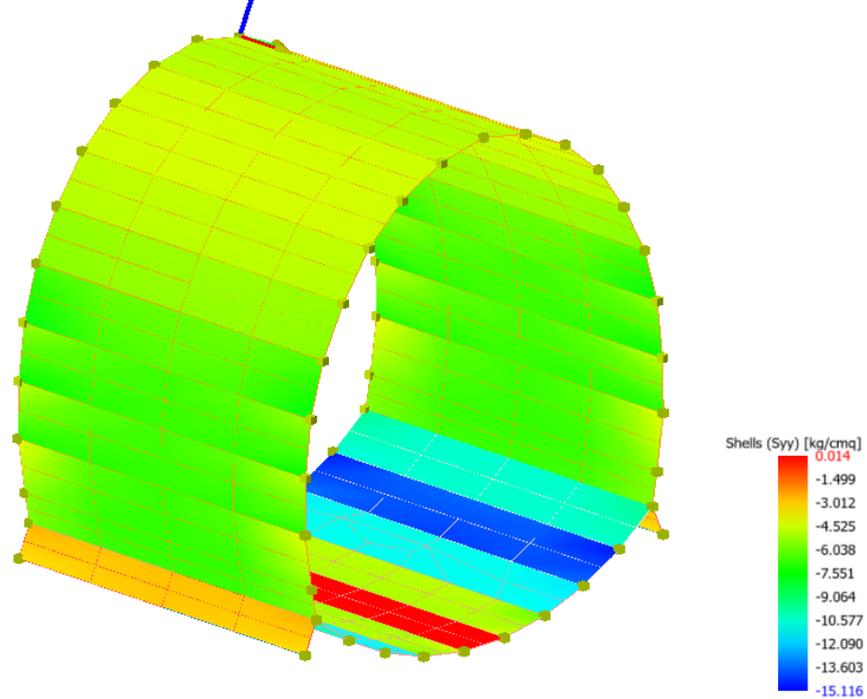


Fig.9\_Risultati: tensioni normali per H=6 m

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Myy

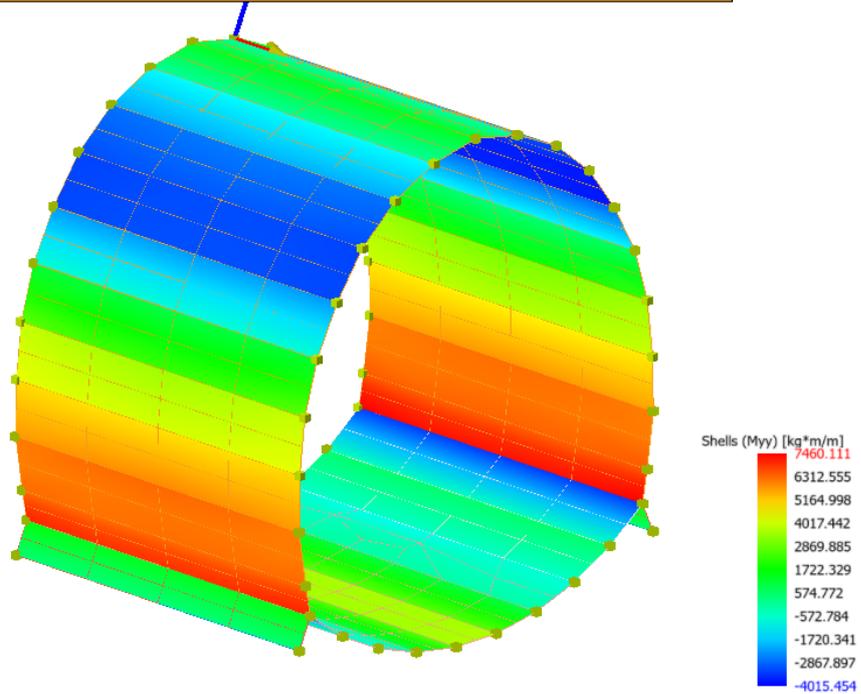


Fig.10\_Risultati: Momenti flettenti per H=6 m

Tipo diagramma: Deformata  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_ 2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 3

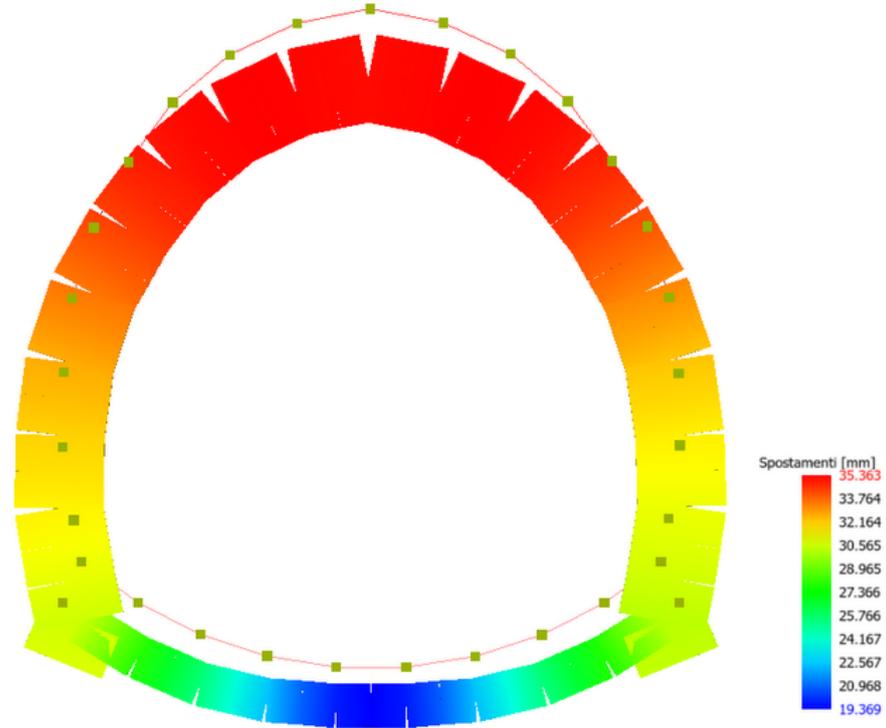


Fig.11\_Risultati: spostamenti per H=14 m

Tipo diagramma: Deformata  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_ 2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 3

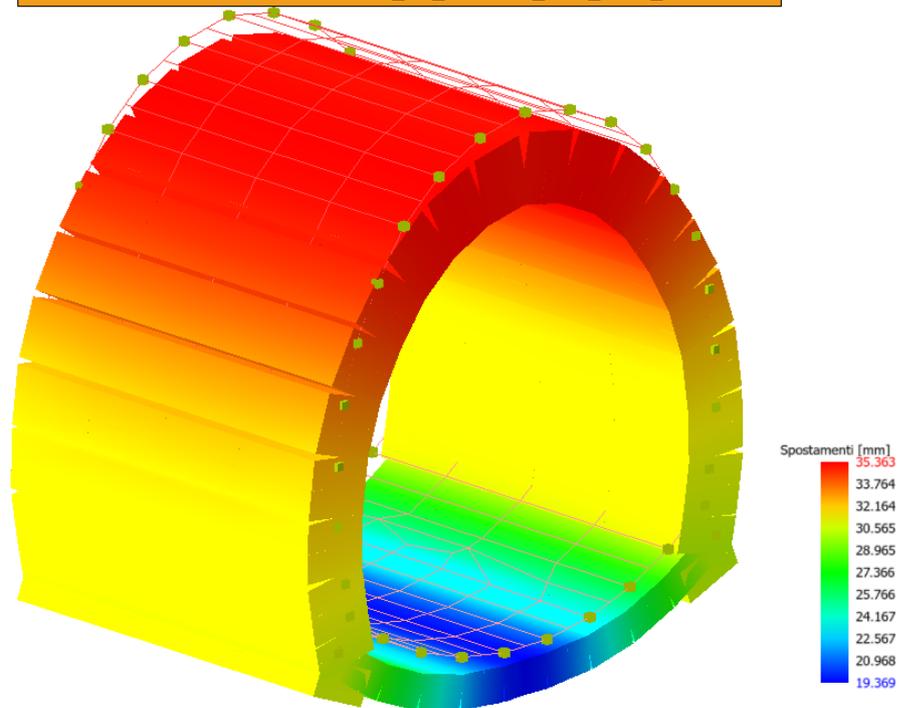


Fig.12\_Risultati: spostamenti per H=6 m

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 3  
 Sollecitazione Muri: Syy

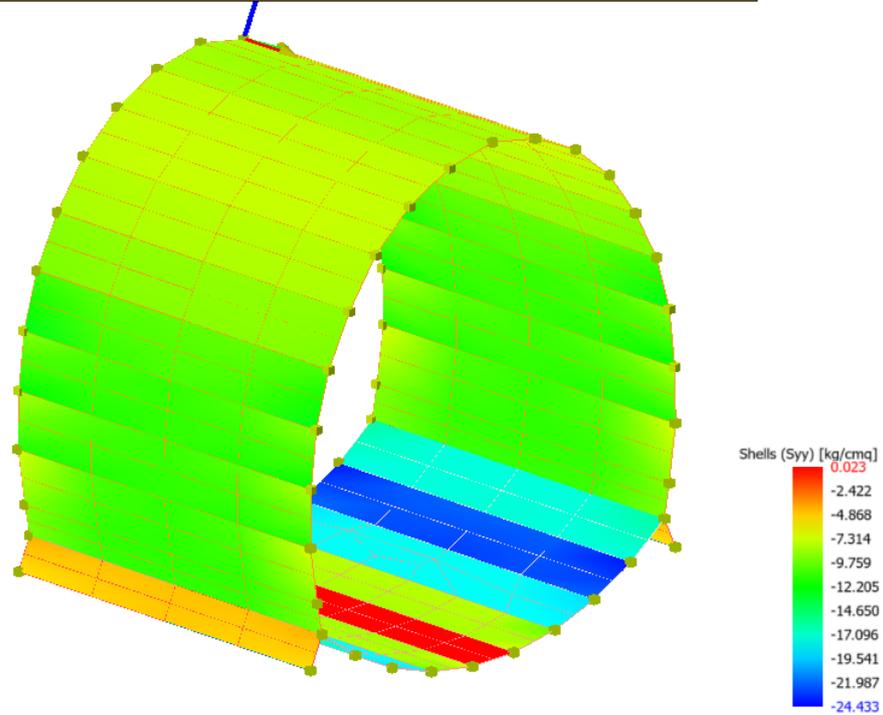


Fig.13\_Risultati: tensioni normali per H=14 m

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 3  
 Sollecitazione Muri: Myy

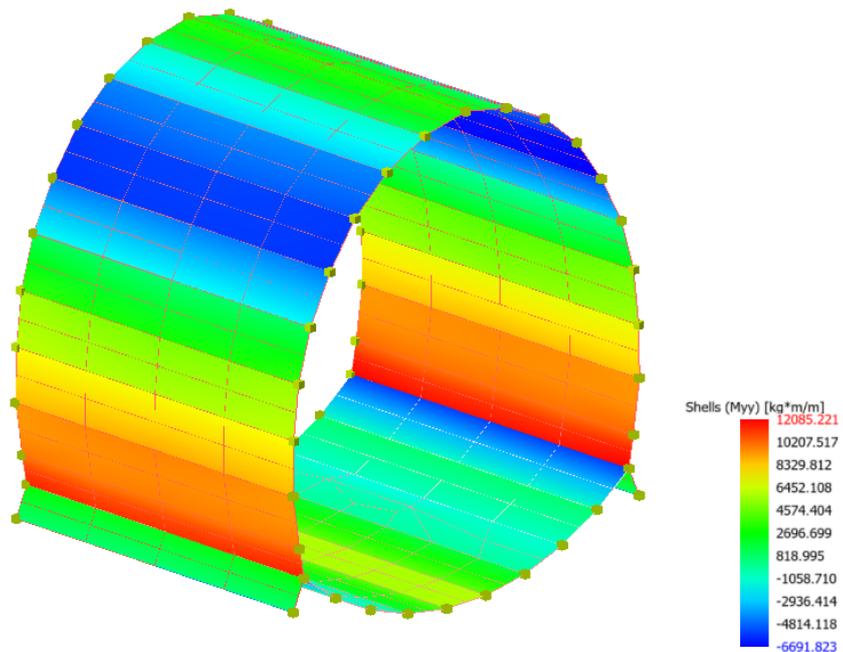


Fig.14\_Risultati: Momenti flettenti per H=14 m

## 7.2.-..ANALISI DI PROGETTO – RISULTATI

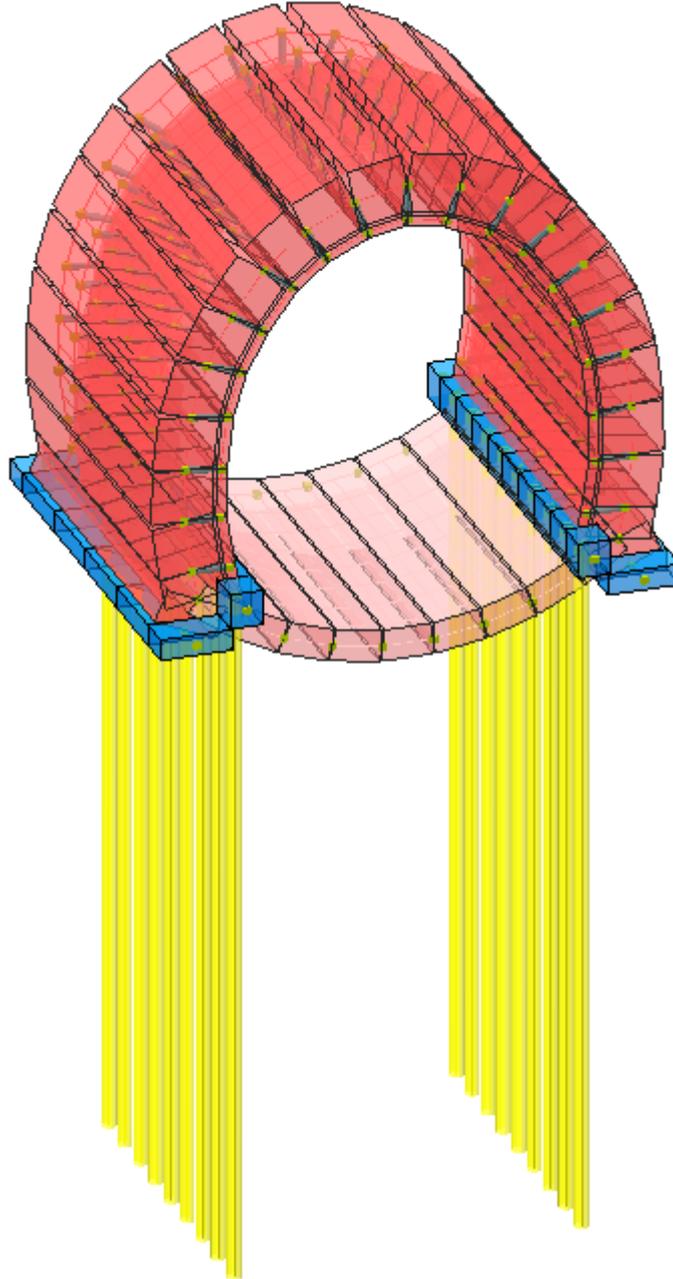


Fig.15\_ Modello di calcolo: Vista prospettica

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
Sollecitazione Muri: Myy



Fig.16\_Modello di calcolo: Vista prospettica, elementi shell e elementi link rigido

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
Sollecitazione Muri: Myy

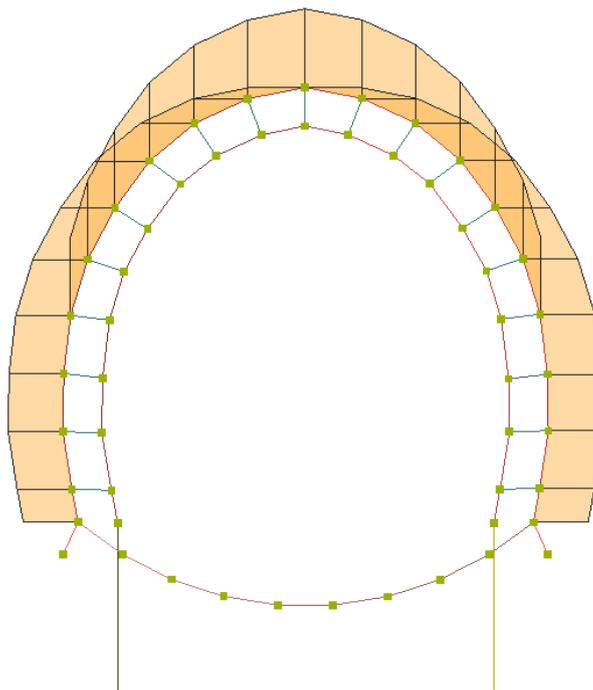


Fig.17\_Modello di calcolo: Carichi applicati

Tipo diagramma: Deformata  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1

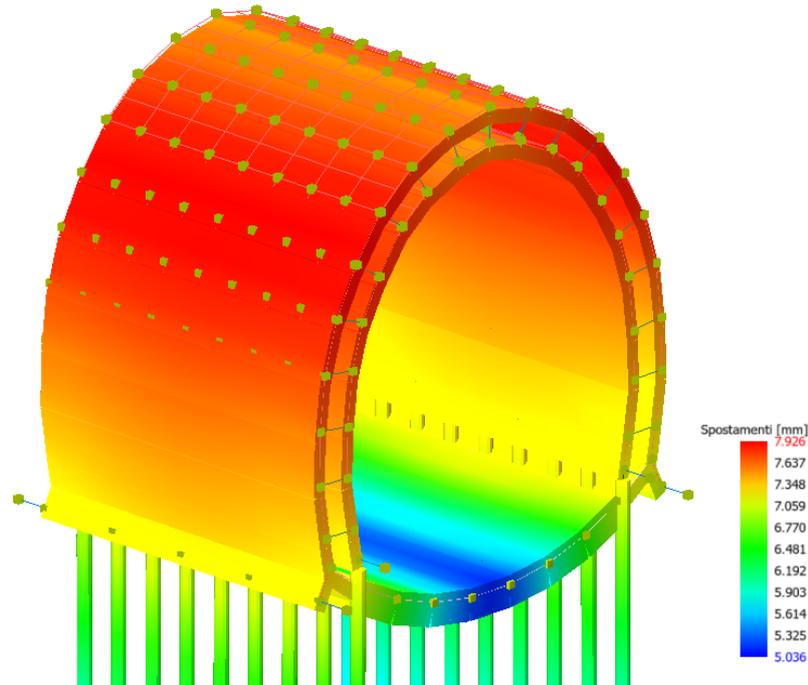


Fig.18\_Risultati: Spostamenti

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
Sollecitazione Muri: Syy

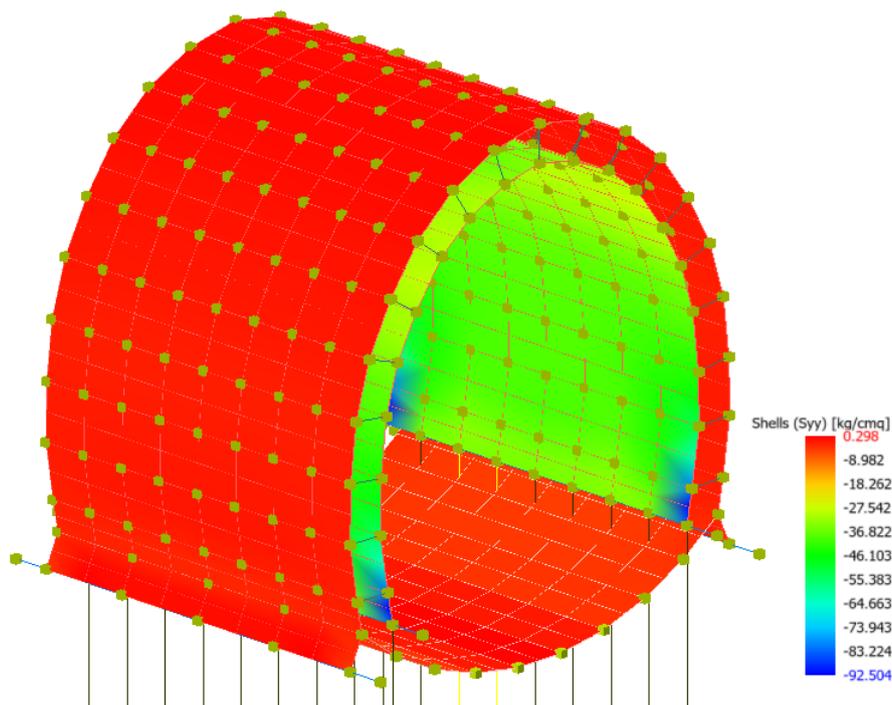


Fig.19\_Risultati: tensioni normali

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Syy

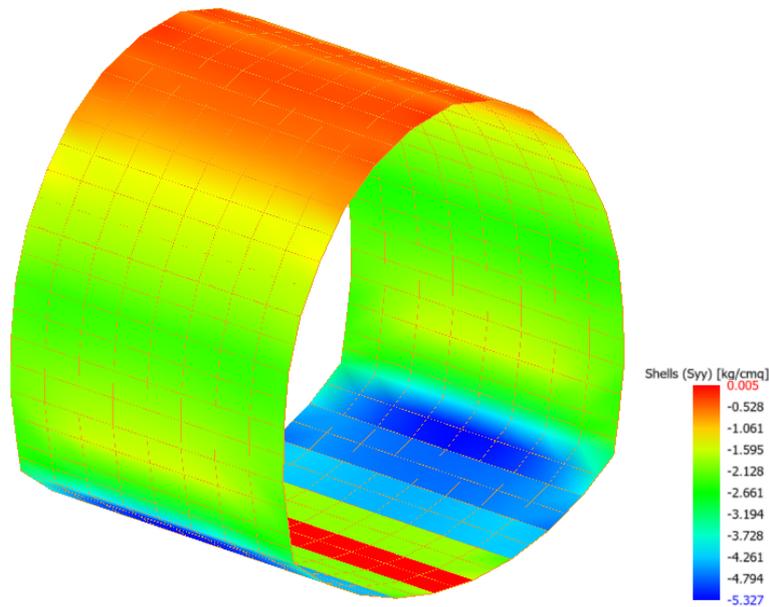


Fig.20\_Risultati: tensioni normali nel rivestimento definitivo esistente

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Myy

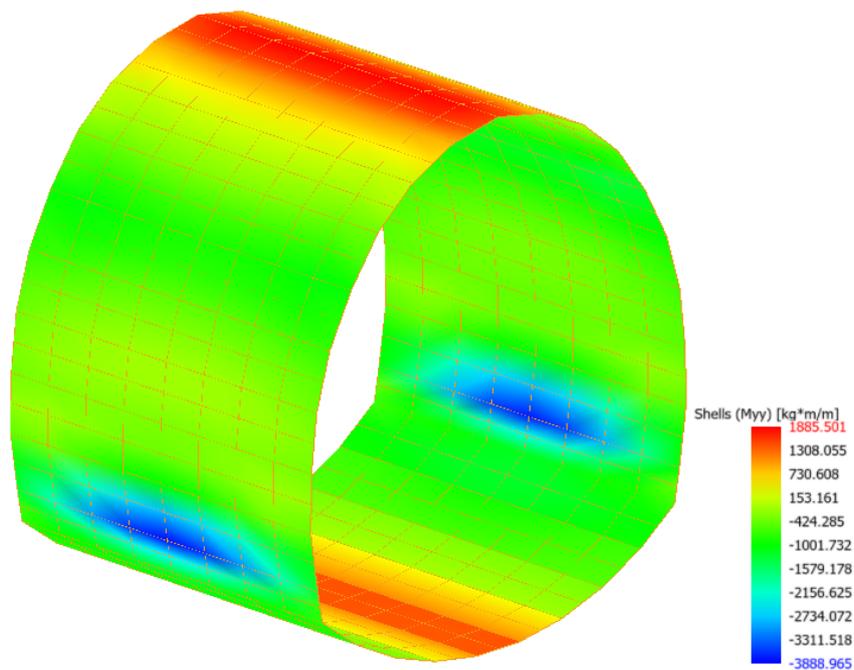


Fig.21\_Risultati: momento flettente nel rivestimento definitivo esistente

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Syy

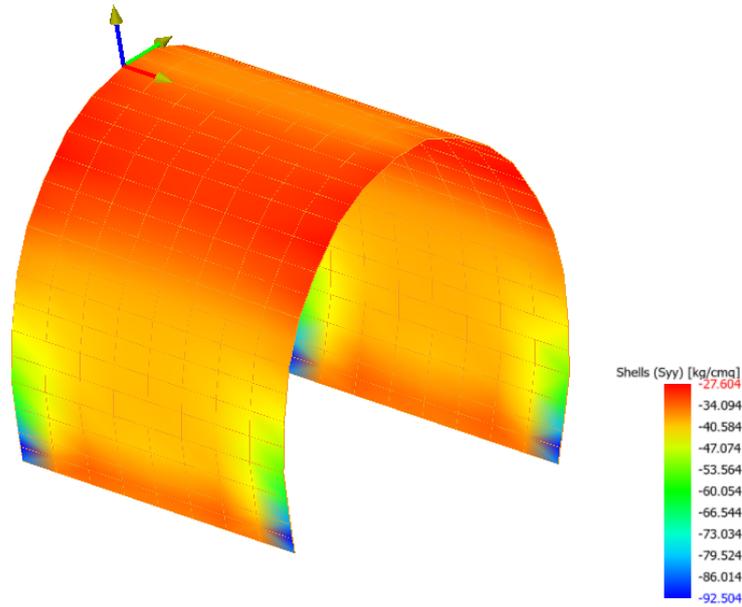


Fig.22\_Risultati: tensioni normali nel blindaggio interno

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
 Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1  
 Sollecitazione Muri: Myy

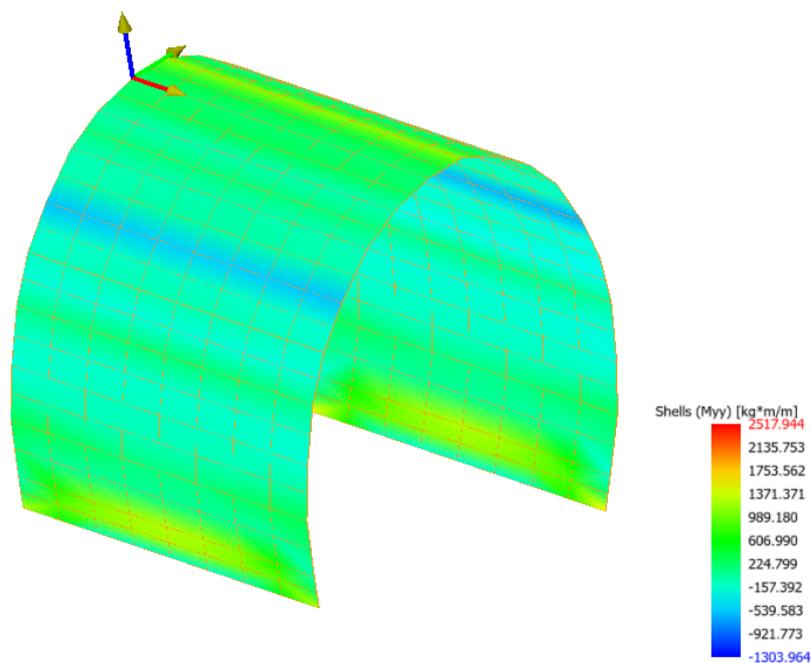


Fig.23\_Risultati: momento flettente nel blindaggio interno

Tipo diagramma: Sollecitazioni  
Combinazione corrente : Scenario Set\_NT\_ 2018 A1\_STR\_GEO\_tunnel - C 1

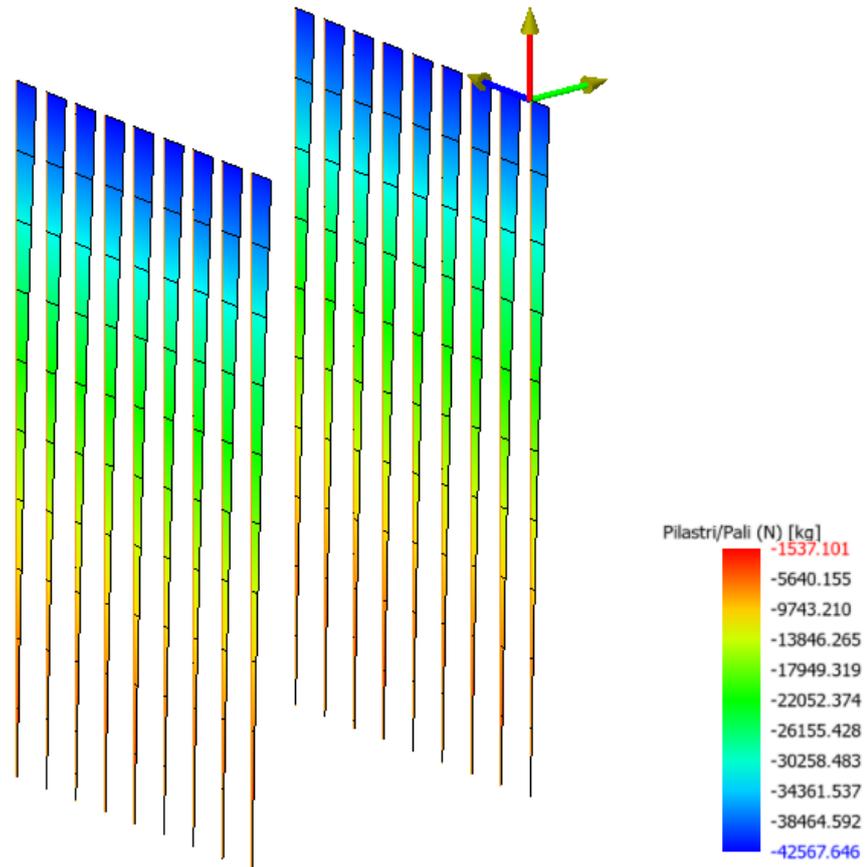


Fig.24\_Risultati: sforzo normale nei pali

7.3.-.RILIEVO GEOMETRICO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO – ELABORAZIONE DEI RISULTATI sono stati desunti dai risultati delle perforazioni di sondaggio eseguite dall'interno della galleria e dalle indagini endoscopiche; i risultati sono riportati nel seguito.

	Elemento\Sezione [pk]	52+041	52+014	51+990	Valore minimo [m]	Valore medio [m]
S1	Piedritto - lato monte	1	0,85	1,05	0,85	0,97
S2	Reni – lato monte	1,30	1,35	1,05	1,05	1,23
S3	Chiave calotta	1,05	1,35	1,25	1,05	1,22
S4	Reni – lato valle	1,20	0,55*	1,20	1,20	1,20
S5	Piedritto - lato valle	0,95	1,65	1,10	0,95	1,23
S6	Attacco piedritto-muretta	-	-	1,05	1,05	1,05
S7	Arco rovescio	0,15+0,20+0,25 = 0,60	0,15+0,20+0,25 = 0,60	0,15+0,15+0,40 = 0,70	0,25	0,3

\*valore anomalo attribuibile ad un difetto locale di costruzione

Nella seguente tabella si riportano i risultati delle indagini endoscopiche

	Elemento\Sezione [pk]	52+041	52+014	51+990	Valore minimo [m]	Valore medio [m]
S1	Piedritto - lato monte	0,93	0,86	0,97	0,86	0,92
S2	Reni – lato monte	0,97	0,95	1,04	0,95	0,99
S3	Chiave calotta	1,02	1,12	1,13	1,02	1,09
S4	Reni – lato valle	0,95	0,58*	0,95	0,95	0,95
S5	Piedritto - lato valle	1,09	1,25	0,87	0,87	1,07
	Attacco muretta arco rovescio			1,17	1,17	1,17

\*valore anomalo attribuibile ad un difetto locale di costruzione

### Indagini nelle sezioni intermedie

Elemento\Sezione [pk]	52+053 (foro A)	52+026 (foro B)	52+001 (foro C)	51+967 (foro D)	Valore minimo [m]	Valore medio [m]
Chiave calotta	1,15	1,05	1,15	1,45	1,05	1,20

### Nella seguente tabella si riportano i risultati delle indagini endoscopiche

Elemento\Sezione [pk]	52+053 (foro A)	52+026 (foro B)	52+001 (foro C)	51+967 (foro D)	Valore medio [m]
Chiave calotta	0,93	0,86	1,13	1,13	1,01